



Simulação de Cenários Acidentais em um Sistema de Gás Combustível presente em Plataformas *Offshore*

Luciana Faria Barbosa de Mello

Projeto de Final de Curso

Orientador

Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc

Novembro de 2015

SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS ACIDENTAIS EM UM SISTEMA DE GÁS COMBUSTÍVEL PRESENTE EM PLATAFORMAS OFFSHORE

Luciana Faria Barbosa de Mello

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Afrânio José de Melo Junior, Eng.Qui.

Armando Lucas Cherem da Cunha, D.Sc

Thiago Coelho d'Avila, Eng.Qui.

Orientado por:

Carlos André Vaz Junior, D.Sc

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Novembro de 2015

Mello, Luciana Faria Barbosa de.

Simulação de cenários acidentais em um sistema de gás combustível presente em plataformas offshore/ Luciana Faria Barbosa de Mello. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2015.

x, 73 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2015.

Orientador: Carlos André Vaz Junior.

1. Segurança de Processos. 2. Offshore. 3. ALOHA. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Carlos André Vaz Junior. I. Simulação de cenários acidentais em um sistema de gás combustível presente em plataformas offshore.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pela minha família, pelo cuidado que tem conosco e pelas oportunidades que tive até aqui.

Aos meus queridos pais, Jorge e Ana Maria, por todo amor, amizade e exemplo que me tornaram quem eu sou e por toda dedicação e apoio que me fizeram chegar até aqui.

Aos meus irmãos, Felipe e Jorginho, por serem grandes companheiros de vida, fazendo com que ela seja mais bonita, enriquecedora e divertida.

À minha cunhada Bia, pela amizade presente nos momentos de alegria e dificuldade.

À toda a minha família, tios e primos que torcem por mim e com quem posso contar.

Aos meus queridos amigos, por decidirem compartilhar seus caminhos comigo, em especial à Karine, minha irmã de coração.

Aos amigos da EQ, por tornaram esse caminho mais fácil, especialmente à Patrícia, pela amizade e companheirismo desde os tempos de pré-vestibular, sem você certamente não teria sido tão divertido e enriquecedor.

Ao professor orientador Carlos André, por todo auxílio e sugestões que contribuíram para a construção desse trabalho.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS ACIDENTAIS EM UM SISTEMA DE GÁS COMBUSTÍVEL PRESENTE EM PLATAFORMAS OFFSHORE

Luciana Faria Barbosa de Mello

Novembro, 2015

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc

A indústria do petróleo se constitui como base da economia mundial, haja vista que o petróleo é uma das principais fontes de energia, e seus derivados são utilizados na produção de variados bens de consumo. Entretanto, é uma indústria conhecida por ter altos custos associados às suas etapas de exploração e produção, especialmente no tocante à produção *offshore* em águas profundas. Com a tendência de migração da produção de petróleo para águas profundas, vem ocorrendo um aumento da complexidade das unidades, e por conseguinte, dos custos envolvidos. Além dos custos de investimento e implantação, há aqueles associados às paradas não-programadas e acidentes nas plataformas, uma vez que os processos envolvem fluidos inflamáveis e são frequentemente submetidos à perturbações, como as causadas por golfadas. Desse modo, é importante destacar a relevância de ferramentas que auxiliem na segurança de processos das plataformas offshore, e assim contribuam para a minimização dos custos envolvidos. Comumente durante a etapa de elaboração de uma plataforma, o levantamento e avaliação de perigos são realizados através de estudos quantitativos e qualitativos. Os estudos qualitativos são feitos com o uso de técnicas como APR e HAZOP. Já os estudos quantitativos de incêndio, explosão e dispersão de gases normalmente são realizados por softwares capazes de simular estes acidentes utilizando informações do processo e a geometria da plataforma. Nesta conjuntura, esse trabalho buscou avaliar os riscos envolvidos em um típico sistema de combustível presente em plataformas *offshore*. Essa análise foi realizada através de simulações no software ALOHA de um dos cenários de maior severidade indicados na APR apresentada por Silva; Santos e Sant'Anna [2015], onde os parâmetros do processo foram obtidos da simulação dinâmica realizada por Vaz [2009], no software HYSYS. Os cenários simulados envolvem *jet fire* e nuvem inflamável a partir de vazamento por ruptura de tubulação. Inicialmente foram realizadas as mesmas simulações que Silva; Santos e Sant'Anna [2015], as quais envolviam uma tubulação ligada a um reservatório infinito. Os resultados foram catastróficos em virtude de limitação imposta pelo ALOHA de que para esses casos a ruptura da tubulação fosse total. Posteriormente foram realizadas simulações que envolviam uma tubulação não ligada a reservatório infinito, a fim de avaliar cenários acidentais menos severos e com maior frequência de ocorrência. Dessa forma, foi possível realizar simulações de rompimento parcial de tubulação. Para esses casos, foram realizadas simulações com a mesma dimensão utilizada por Silva; Santos e Sant'Anna [2015] e posteriormente com uma tubulação de diâmetro e comprimento vinte vezes maiores. Assim, foi possível ultrapassar a limitação inicialmente imposta pelo ALOHA. Além disso, para cada uma dessas dimensões de tubulação, os tamanhos de furo de vazamento utilizados foram de 0,2 cm, 0,5 cm, 0,8 cm e 1,0 cm de raio. Os resultados mostraram que o aumento de tamanho dos furos de vazamento apresentou influência maior nos resultados do que o aumento nas dimensões de tubulação.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Unidades de Processamento de Petróleo.....	12
1.2 Risco em unidades Offshore	16
2 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS.....	18
2.1 Modelagem ALOHA.....	18
2.1.1 Modelo de dispersão Gaussiano	18
2.1.2 Modelo de dispersão de gás denso	22
2.2 Cenários	23
2.2.1.1 Cenário de <i>Jet fire</i>	24
2.2.1.2 Cenário de <i>Flash fire</i>	25
2.3 Limitações do ALOHA	25
3 ANÁLISE DE RISCO DE UM SISTEMA DE GÁS COMBUSTÍVEL	27
3.1 Simulação de um sistema de gás combustível	27
3.2 Análise Preliminar de Risco do sistema de gás combustível.....	34
4 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS ACIDENTAIS	36
4.1 Simulação de Cenários envolvendo <i>jet fire</i>	38
4.1.1 Simulação de Rompimento Total da Tubulação	40
4.1.2 Simulação de Furo na Tubulação	42
4.2 Simulação de Cenários envolvendo nuvem inflamável	56
4.2.1 Simulação de Rompimento Total da Tubulação	57
4.2.2 Simulação de Furo na Tubulação	59
5 CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Desenho ilustrativo de uma Plataforma Jaqueta	13
Figura 1.2: Plataforma Auto-elevatória	14
Figura 1.3: Plataforma Semi-submersível	15
Figura 1.4: Plataforma FPSO.....	15
Figura 1.5: Conexão entre poços de petróleo e plataformas.....	15
Figura 2.1: Distribuição Gaussiana da concentração de um gás em dispersão	19
Figura 2.2: Dispersão de um gás denso	22
Figura 3.1: Fluxograma simplificado de um sistema de gás combustível.....	29
Figura 3.2: Pré-aquecimento do gás	31
Figura 3.3: Expansão e remoção de condensado	32
Figura 3.4: Aquecimento Final.....	32
Figura 4.1: Captura de tela do ALOHA com informações de localização da plataforma.....	36
Figura 4.2: Captura de tela do ALOHA com características atmosféricas parte 1.....	37
Figura 4.3: Captura de tela do ALOHA com características atmosféricas parte 2.....	38
Figura 4.4: Captura de tela de especificação do tipo de falha	39
Figura 4.5: Captura de tela com especificações da tubulação	39
Figura 4.6: Recomendação do ALOHA para comprimento de gasoduto.....	40
Figura 4.7: Captura de tela com especificações de pressão, temperatura e dimensão do furo.....	40
Figura 4.8: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> para rompimento total da linha C-02	41
Figura 4.9: Zonas de ameaça para <i>jet fire</i> em rompimento total da linha C-02	41
Figura 4.10: Comportamento da taxa de combustão no tempo para <i>jet fire</i> com rompimento total da tubulação.....	42
Figura 4.11: Captura de tela com especificações da tubulação	43
Figura 4.12: Captura de tela com especificações de pressão, temperatura e dimensão do furo...	44
Figura 4.13: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> para rompimento da linha C-02 com furo de 0.2cm de raio	44
Figura 4.14: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> para rompimento da linha C-02 com furo de 0.5 cm	45

Figura 4.15: Zonas de ameaça para <i>jet fire</i> a partir de um furo de 0.5 cm de raio	45
Figura 4.16: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> para rompimento da linha C-02 com furo de 0.8 cm	46
Figura 4.17: Zonas de ameaça para <i>jet fire</i> a partir de um furo de 0.8 cm de raio	46
Figura 4.18: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> para rompimento da linha C-02 com furo de 1 cm	46
Figura 4.19: Zonas de ameaça para <i>jet fire</i> a partir de um furo de 1 cm de raio	47
Figura 4.20: Captura de tela com especificações da tubulação	48
Figura 4.21: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> para rompimento da linha C-02 com furo de 0.2 cm	48
Figura 4.22: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> para rompimento da linha C-02 com furo de 0.5 cm	49
Figura 4.23: Zonas de ameaça para <i>jet fire</i> a partir de um furo de 0.5 cm de raio	49
Figura 4.24: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> para rompimento da linha C-02 com furo de 0.8 cm	50
Figura 4.25: Zonas de ameaça para <i>jet fire</i> a partir de um furo de 0.8 cm de raio	50
Figura 4.26: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> para rompimento da linha C-02 com furo de 1.0 cm	51
Figura 4.27: Zonas de ameaça para <i>jet fire</i> a partir de um furo de 1.0 cm de raio	51
Figura 4.28: Comportamento da taxa de combustão no tempo para <i>jet fire</i> em tubo com 81.28 m de comprimento	52
Figura 4.29: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> em tubo com 163 m de comprimento.....	53
Figura 4.30: Comportamento da taxa de combustão no tempo para <i>jet fire</i> em tubo com 163 m de comprimento	53
Figura 4.31: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> em tubo com 650 m de comprimento.....	53
Figura 4.32: Comportamento da taxa de combustão no tempo para <i>jet fire</i> em tubo com 650 m de comprimento	54
Figura 4.33: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> em tubo com 1.301 m de comprimento.....	54
Figura 4.34: Comportamento da taxa de combustão no tempo para <i>jet fire</i> em tubo com 1.301 m de comprimento	54
Figura 4.35: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> em tubo com 20.000 m de comprimento.....	55
Figura 4.36: Comportamento da taxa de combustão no tempo para <i>jet fire</i> em tubo com 20.000 m de comprimento	55

Figura 4.37: Resultados da simulação de <i>jet fire</i> em tubo com 28.150 m de comprimento.....	55
Figura 4.38: Comportamento da taxa de combustão no tempo para <i>jet fire</i> em tubo com 28.150 m de comprimento	56
Figura 4.39: Captura de tela com especificação do tipo de falha, onde o gás não entra em combustão ao escapar da tubulação.....	56
Figura 4.40: Captura de tela com especificação do tipo de perigo a ser analisado	57
Figura 4.41: Captura de tela com especificações da tubulação	58
Figura 4.42: Captura de tela com especificações de pressão, temperatura e dimensão do furo...	58
Figura 4.43: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável	59
Figura 4.44: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de rompimento total	59
Figura 4.45: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.2 cm	60
Figura 4.46: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.2 cm.....	60
Figura 4.47: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.5 cm	61
Figura 4.48: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.5 cm.....	61
Figura 4.49: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.8 cm	62
Figura 4.50: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.8 cm.....	62
Figura 4.51: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 1.0 cm	63
Figura 4.52: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 1.0 cm.....	63
Figura 4.53: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.2 cm	64
Figura 4.54: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.2 cm.....	65
Figura 4.55: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.5 cm	65
Figura 4.56: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.5 cm.....	65
Figura 4.57: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.8 cm	66
Figura 4.58: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.8 cm.....	66

Figura 4.59: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 1.0 cm	67
Figura 4.60: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 1.0 cm.....	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Classes de estabilidade atmosférica.....	20
Tabela 2.2: Classes de estabilidade em função das condições atmosféricas	21
Tabela 2.3: Coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford	21
Tabela 2.4: Fontes e cenários do ALOHA	24
Tabela 3.1: Composição das correntes de entrada do sistema de gás combustível (% molar).....	31
Tabela 3.2: Caracterização das correntes	33
Tabela 3.3: Categorias de Severidade.....	34
Tabela 3.4: Análise Preliminar de Riscos.....	35
Tabela 4.1:Parâmetros Meteorológicos recomendados pela Norma CETESB P4.261	37
Tabela 4.2: Raios das zonas de ameaça em função dos raios de furo	47
Tabela 4.3: Raios das zonas de ameaça em função dos raios de furo e tamanho de tubulação ...	52
Tabela 4.4: Raios das zonas de ameaça de jet fire e comprimento das zonas de ameaça de nuvem inflamável em função dos raios de furo.....	64
Tabela 4.5: Raios das zonas de ameaça de <i>jet fire</i> e comprimento das zonas de ameaça de nuvem inflamável em função dos raios de furo e tamanho de tubulação.....	68

1 INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo possui importância essencial na economia mundial, visto que o petróleo é uma das principais fontes de energia, e seus derivados são utilizados como matéria-prima para a produção de grande variedade de bens de consumo [MARIANO, 2001]. Segundo a Agência Internacional de Energia, a energia proveniente do petróleo e do gás natural representa mais da metade da energia primária consumida no mundo, e não se espera mudança nesse cenário nos próximos anos [REPSOL, 2015].

A cadeia de exploração e produção do petróleo é constituída, em função do ciclo de vida de um campo petrolífero, em três etapas: exploração, desenvolvimento e produção [BNDES]. Os custos associados a cada uma dessas etapas são bastante elevados, principalmente quando se trata da produção *offshore* em águas profundas ou ultraprofundas [COSTA, 2008].

Ainda que os custos e riscos envolvidos na produção *offshore* sejam mais expressivos do que nos outros setores do segmento *upstream*, os investimentos no setor tem se mostrado mais significativos e com maior expectativa de crescimento do que nos demais. A disponibilidade financeira das grandes petroleiras, o avanço tecnológico e o acúmulo de conhecimento nessa área, são fatores que contribuem para esse cenário [INFOPETRO, 2011].

Além dos custos de investimento e implantação, há aqueles associados às paradas não programadas e acidentes nas plataformas. Devido às características de escoamento em *risers* de produção, uma plataforma *offshore* frequentemente é submetida a oscilações, como as golfadas. Além disso, o risco de acidentes envolvendo incêndio ou explosões é significativo, uma vez que os processos envolvem fluidos inflamáveis com altas pressões e vazões [VAZ, 2009].

Assim, ferramentas que auxiliem na segurança dos processos de uma plataforma *offshore*, através da prevenção de riscos e treinamento dos operadores, são importantes por contribuírem com a minimização de custos associados às paradas não programadas, danos materiais e pessoais resultantes de acidentes [VAZ, 2009].

No gerenciamento de riscos industriais, algumas técnicas são comumente utilizadas com objetivo de identificar os possíveis cenários acidentais de uma instalação e as respectivas causas, consequências, e modos de prevenção e controle. Abordagens como APR e HAZOP podem ser usadas. A APR, Análise Preliminar de Riscos, consiste numa avaliação inicial dos principais riscos, sendo normalmente utilizada durante a concepção de um projeto, onde se

realiza uma estimativa da frequência e severidade relacionadas aos eventos acidentais. Já o HAZOP, Estudo de Perigos e Operabilidade, investiga de maneira minuciosa e sistemática cada segmento do processo, buscando propor medidas tanto para os problemas de segurança quanto para os de operabilidade da instalação, podendo ser utilizado em qualquer estágio de vida de uma instalação [AGUIAR, 2015].

Além da análise qualitativa proposta pelas abordagens APR e HAZOP, muitas empresas e instituições governamentais utilizam programas computacionais para simular cenários de acidentes, buscando uma avaliação mais precisa dos cenários acidentais apontados. Geralmente esses softwares utilizam modelagens matemáticas para estimar os efeitos dos possíveis acidentes sobre as próprias instalações e sobre as regiões vizinhas, dando suporte à avaliação dos riscos em termos quantitativos. Auxilia ainda na elaboração de planejamentos de emergências [DNV, 2015].

Nesse contexto, este trabalho adotou como metodologia a simulação de cenários acidentais em um sistema de condicionamento de gás combustível para turbinas, comumente presente em plataformas *offshore*. Foram realizadas simulações a partir de um dos cenários de maior severidade proposto na APR elaborada por Silva, Santos e Sant'Anna [2015]. Os cenários foram aqui simulados usando o software ALOHA. Os dados operacionais foram obtidos a partir da simulação dinâmica do processo, no software HYSYS, realizada por Vaz [2009].

1.1 Unidades de Processamento de Petróleo

Petróleo e gás natural geralmente são encontrados na natureza sob a forma de uma mistura contendo óleo, gás, água e impurezas. Na medida em que o interesse econômico está nos hidrocarbonetos, é preciso que água e impurezas sejam separadas antes que óleo e o gás sejam enviados a unidades de refino [SANT'ANNA, 2005].

As unidades de processamento primário de petróleo tem a finalidade de separar as fases óleo, gás e água, além de remover impurezas [THOMAS, 2001]. Após a separação, as correntes de óleo e gás são conduzidas respectivamente para as refinarias e para as Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGN), enquanto a corrente de água pode ser reinjetada para recuperação secundária do óleo ou descartada para o mar [VAZ, 2009].

Segundo Thomas [2001] a estrutura de uma planta de processamento primário depende da natureza dos fluidos e da viabilidade técnico-econômica. Assim, enquanto as

estruturas mais simples realizam apenas a separação gás/óleo/água, as mais complexas englobam o condicionamento e compressão do gás, tratamento e estabilização do óleo e tratamento da água para reinjeção ou descarte. Além disso, as plataformas dispõem de diversas estruturas de apoio, como alívio, drenagem, ar comprimido e diesel [VAZ, 2009].

Normalmente as estruturas das plataformas *offshore* são compactas, sendo os equipamentos projetados para máxima economia de espaço. O menor volume faz com que tais equipamentos possuam menor capacidade de absorver oscilações, o que gera uma demanda por estratégia e sintonia de controle capazes de prevenir a propagação de perturbações ao longo da planta [VAZ, 2009].

Existem diversos tipos de plataformas *offshore* e a escolha da estrutura adequada a ser utilizada em determinada exploração comumente é determinada através de um EVTE (Estudo de Viabilidade Técnico e Econômica). Tal estudo considera, dentre outros fatores, o volume de produção, a lâmina d'água (profundidade que se deseja atingir) e a viabilidade econômica do processo [AMORIM, 2010].

A classificação mais comum divide as plataformas em fixas e flutuantes. As plataformas fixas são estruturas fixadas diretamente no solo marinho por meio de estacas ou gravidade e são utilizadas em lâminas d'água de até 300 metros. Dentre os tipos de plataformas fixas mais utilizadas, é possível citar a Jaqueta (Figura 1.1), formada por uma estrutura treliçada em aço e fixada no solo marinho através de estacas, e a Auto-elevatória (Figura 1.2), que são unidades móveis utilizadas em lâminas d'água de até 130 metros [AMORIM, 2010].

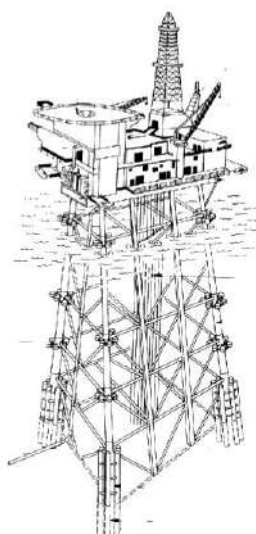


Figura 1.1: Desenho ilustrativo de uma Plataforma Jaqueta

Fonte: http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/98-9/offshore/rig.jpg



Figura 1.2: Plataforma Auto-elevatória. Fonte: OLIVEIRA, 2013.

À medida que as profundidades se tornam maiores, a instabilidade aumenta. Isso gera a necessidade por plataformas fixas com bases muito grandes e assim economicamente inviáveis devido à quantidade de aço empregada. Assim, a descoberta de poços de petróleo em lâminas d'água maiores que 1000 metros motivou o desenvolvimento das plataformas flutuantes [AMORIM, 2010].

As plataformas flutuantes são estruturas complacentes, uma vez que apresentam grandes deslocamentos sob ação de ondas, correntes e vento. Assim, tais estruturas são posicionadas no solo marinho através de um sistema de ancoragem que limite estes deslocamentos a níveis aceitáveis [AMORIM, 2010]. Dentre as mais frequentemente utilizadas estão a semi-submersível (Figura 1.3) e a FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) (Figura 1.4). O primeiro tipo é formado essencialmente pelos flutuadores e pelas colunas. Enquanto os flutuadores estão localizados abaixo da linha d'água garantindo a flutuabilidade e minimizando os movimentos de onda da plataforma, as colunas são responsáveis pela estabilidade da mesma. Já o segundo tipo, são navios que produzem, armazenam e realizam o escoamento do petróleo [VAZ, 2009] [AMORIM, 2010].

Os poços de produção de petróleo são conectados de forma direta às plataformas (poços satélites) ou por meio de *manifolds* que interligam vários poços e encaminham para a plataforma [VAZ, 2009]. Ambas as configurações são ilustradas na Figura 1.5.



Figura 1.3: Plataforma Semi-submersível. Fonte: UNIPEG, 2010.



Figura 1.4: Plataforma FPSO. Fonte: UNIPEG, 2010.

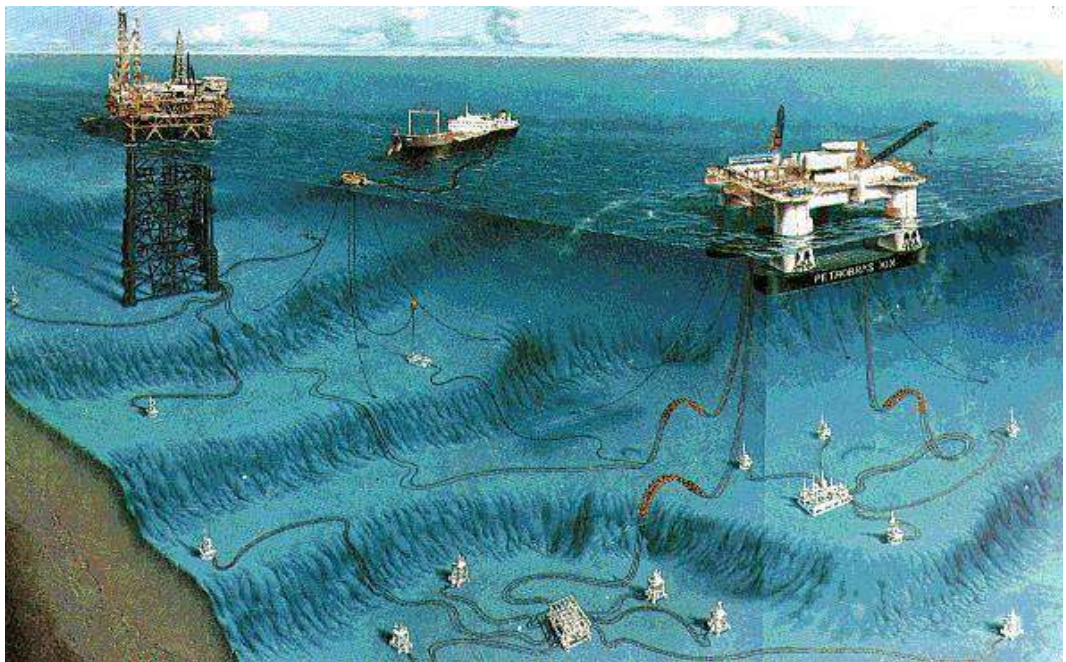


Figura 1.5: Conexão entre poços de petróleo e plataformas. Fonte: VAZ, 2009.

1.2 Risco em unidades Offshore

O risco de acidentes é um fator de elevada importância no contexto das plataformas *onshore* e *offshore*. No que diz respeito às unidades *offshore*, os riscos são aumentados em razão das condições críticas de espaço e ambiente, como isolamento geográfico, unidades compactas, maior frequência e propagação de perturbações, alto grau de salinidade e umidade [VAZ, 2009] [MAIA, 2007].

Segundo Maia [2007], o processo de migração da produção de petróleo para águas profundas tem sido acompanhado por um aumento da complexidade das unidades e do inventário de produtos perigosos, de modo que os acidentes passam a alcançar cenários ainda mais severos.

Uma série de grandes acidentes ocorreu a partir do crescimento da indústria *offshore*, sendo a explosão da plataforma Piper Alpha (1988), localizada no Mar do Norte, um dos casos mais emblemáticos [MAIA, 2007]. Um vazamento de gás natural, devido a uma sequência de erros durante a manutenção de uma bomba, provocou uma explosão seguida de incêndio, resultando em 167 mortes, destruição total da plataforma e prejuízo de centenas de milhões de dólares [VAZ, 2009].

Após o acidente, foi elaborado um inquérito para apurar as causas do mesmo. Esta investigação originou um importante relatório conhecido como “*Lord Cullen Report*”, onde foram feitas 106 recomendações para a melhoria das condições de segurança das plataformas *offshore* no Reino Unido. Dentre as recomendações, a que causou maior impacto em relação à segurança das instalações *offshore* foi a determinação de que todas as companhias operadoras implantassem sistemas de gestão de segurança em suas plataformas, e que submetessem periodicamente a um relatório chamado “*Safety Case Report*” [DINIZ, *et al.*, 2006].

Outro grave acidente que impulsionou o desenvolvimento do gerenciamento de riscos em plataformas *offshore* foi o ocorrido na plataforma semi-submersível de Alexander Kielland, na Noruega (1980). Os cabos que ancoravam a plataforma ao fundo do mar sofreram fratura por desgaste, resultando no afundamento da unidade e 123 mortes [SILVA; SANTOS; SANT’ANNA, 2015].

A contenção dos acidentes e a evacuação da tripulação são dificultadas pelo isolamento geográfico e compactação das plataformas *offshore*. Tais condições demonstram a necessidade de contar com um sistema eficiente de gerenciamento de risco nestas unidades [SILVA; SANTOS; SANT’ANNA, 2015].

Finalmente, em situações críticas é realizado procedimento de emergência, intitulado *Emergency Shutdown System* (ESD), onde determinada área é isolada e as conexões com as demais áreas são interrompidas, com o propósito de reduzir a possibilidade de propagação e amplificação do acidente. As principais finalidades do ESD são preservar a tribulação e as instalações, além de evitar impactos ao meio ambiente [NOLAN, 2014, *apud*, SILVA; SANTOS; SANT'ANNA, 2015].

2 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS

De acordo com Oliveira [2008], durante a etapa de elaboração de uma plataforma, a avaliação dos riscos comumente é feita por meio de estudos qualitativos e quantitativos. Enquanto os estudos qualitativos são realizados através de técnicas como APR e HAZOP, os estudos quantitativos empregam softwares de apoio. Um exemplo desse tipo de ferramenta é o software ALOHA.

O ALOHA é um programa computacional desenvolvido pelos órgãos governamentais norte-americanos Environmental Protection Agency (EPA) e National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Este software tem como objetivo permitir a simulação de cenários acidentais diversos. Deste modo, o ALOHA torna-se útil no planejamento e treinamento da resposta para situações de emergência. Além disso, a utilização do software se mostra vantajosa por se tratar de um programa amplamente distribuído e de fácil utilização.

2.1 Modelagem ALOHA

Segundo a NOAA [1992], a configuração original do ALOHA era bastante simples, baseada apenas no uso de modelos gaussianos de dispersão atmosférica. No decorrer dos anos, o software foi sendo ampliado para atender um maior número de cenários. Em suas versões mais recentes o ALOHA é capaz de simular não apenas dispersões atmosféricas tanto por modelos gaussianos quanto por modelos de gás denso, mas também simula incêndios e explosões [NOAA, 1992].

Especificamente os modelos de dispersão se destinam a estimar áreas atingidas por uma liberação de gás ou vapor, prevendo os níveis de toxicidade e inflamabilidade que atingirão as regiões vizinhas. Os valores estimados são então comparados com níveis de referência considerados seguros, denominados LOCs (Levels of Concern). O ALOHA sugere três valores de LOCs padronizados para cada tipo de cenário, contudo o usuário pode escolher outros valores de referência [EPA e NOAA, 2007].

2.1.1 Modelo de dispersão Gaussiano

A dispersão atmosférica de gases que possuem densidade aproximadamente igual a do ar apresenta-se na forma de curvas gaussianas. Os modelos que utilizam essa distribuição são

denominados “modelos gaussianos” [NOAA, 1992]. As moléculas do gás em dispersão são movidas pelo vento e pela turbulência atmosférica, de forma que o gás é soprado na direção do vento (eixo X) e disperso nas direções perpendiculares (eixos Y e Z) [SARTORI, 2014].

A distribuição gaussiana de um gás é representada na Figura 2.1, onde é possível observar a comportamento da concentração do gás ao longo da direção do vento (*downwind*) e das direções perpendiculares (*crosswind* ou eixo Y, e eixo Z). A partir de cortes perpendiculares ao eixo X nota-se que em qualquer fatia a concentração apresenta a forma de um sino, sendo mais elevada no centro e menor nas laterais. No ponto próximo à fonte de liberação a concentração é máxima no centro, e a curva assume forma de um pico. À medida que a nuvem de vapor se afasta da fonte a concentração vai sendo reduzida [EPA e NOAA, 2007].

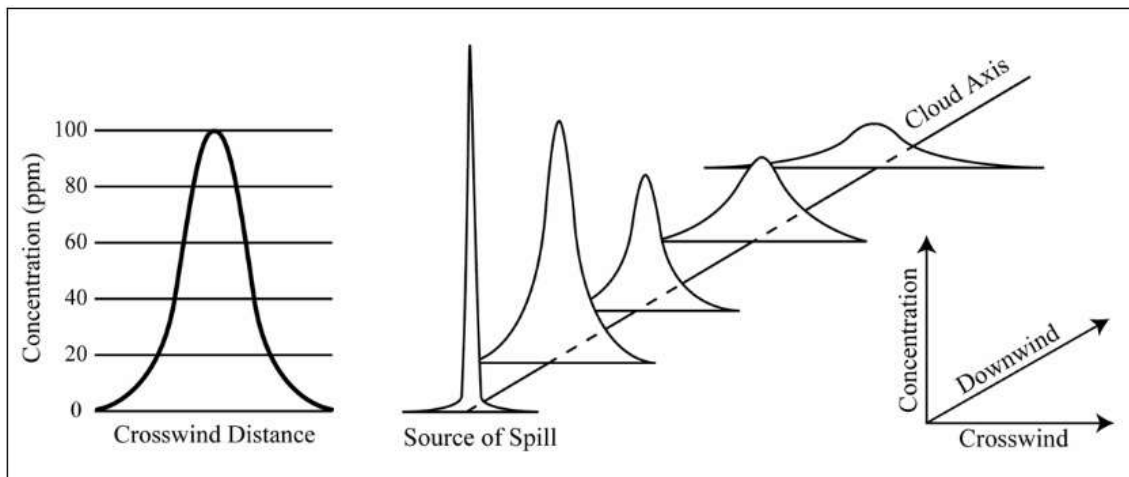


Figura 2.1: Distribuição Gaussiana da concentração de um gás em dispersão. Fonte: EPA E NOAA, 2007.

A equação que descreve a concentração de um gás em dispersão pelo modelo Gaussiano é [NOAA, 1992]:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h_s}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h_s}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

Onde:

C é a concentração do contaminante (g/m^3);

Q é a taxa de emissão da fonte (g/s);

x é distância de afastamento do alvo até a fonte na direção do vento (m);

y é distância de afastamento do alvo até a fonte na direção transversal do vento (m);

z é altura do alvo em relação ao solo (m);

$\sigma_y(x)$ e $\sigma_z(x)$ são coeficientes de dispersão na direção horizontal perpendicular ao vento (eixo y) e na direção vertical (eixo z), respectivamente (m);

U é velocidade do vento na altura do ponto de vazamento (m/s);

h_s é altura efetiva da fonte;

A solução da equação do modelo Gaussiano representa situações reais através de parâmetros empíricos, os coeficientes de dispersão. Tais parâmetros podem ser dependentes do tempo, caracterizando os modelos “puff”, ou independentes do tempo, tipificando os modelos “pluma”. A maneira pela qual os coeficientes de dispersão são calculados, em função da estabilidade atmosférica e distância da fonte emissora, particulariza o modelo de Gauss em diferentes versões [MOREIRA, 2004].

Os coeficientes de dispersão de pluma variam de acordo com alguns parâmetros, como velocidade do vento, rugosidade do solo, altura acima da superfície e distância da fonte. Esses coeficientes são comumente determinados com base na estabilidade da atmosfera, que é dividida em seis classes conforme Tabela 2.1 [ALLEN e DURRENBERGER, 2013].

Tabela 2.1: Classes de estabilidade atmosférica.

Descrição	Classe
Extremamente Instável	A
Moderadamente Instável	B
Levemente Instável	C
Condições Neutras	D
Levemente Estável	E

Fonte: ALLEN E DURRENBERGER, 2013.

A estabilidade da atmosfera depende da velocidade do vento e da intensidade de luz solar. O aumento da velocidade do vento aumenta a estabilidade atmosférica durante o dia, e o efeito contrário ocorre durante a noite. Isso é explicado devido à inversão que ocorre nos perfis de temperatura do dia para a noite [CROWL e LOUVAR, 2002]. A Tabela 2.2 contém uma classificação das estabilidades atmosféricas em função das condições atmosféricas (velocidade do vento, insolação e nebulosidade).

Foram desenvolvidos muitos modelos para determinar os coeficientes de dispersão em função da estabilidade atmosférica. A abordagem mais amplamente utilizada tem como base o trabalho de Pasquill-Gifford [ALLEN E DURRENBERGER, 2013]. Os coeficientes de

dispersão de Pasquill-Gifford estão relacionados com as classes de estabilidade do local do vazamento e estão representados na Tabela 2.3.

Tabela 2.2: Classes de estabilidade em função das condições atmosféricas.

Velocidade do vento (m/s)	Insolação ao longo do dia			Condições noturnas	
	Forte	Forte Moderada	Fraca	>4/8 de céu encoberto	≤3/8 de céu encoberto
< 2	A	A-B	B	-	-
2 a 3	A-B	B	C	E	F
3 a 4	B	B-C	C	D	E
4 a 6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Fonte: CROWL E LOUVAR, 2002.

Tabela 2.3: Coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford.

Classe de estabilidade Pasquill-Gifford	σ_y (m)	σ_z (m)
Condições Rurais		
A	$0,22x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,20x$
B	$0,16x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,12x$
C	$0,11x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,08x(1+0,0002x)^{-1/2}$
D	$0,08x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,06x(1+0,0015x)^{-1/2}$
E	$0,06x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,03x(1+0,0003x)^{-1}$
F	$0,04x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,016x(1+0,0003x)^{-1}$
Condições Urbanas		
A - B	$0,32x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,24x(1+0,0001x)^{-1/2}$
C	$0,22x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,20x$
D	$0,16x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,14x(1+0,0003x)^{-1/2}$
E - F	$0,11x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,08x(1+0,0015x)^{-1/2}$

Fonte: CROWL E LOUVAR, 2002.

2.1.2 Modelo de dispersão de gás denso

Alguns gases apresentam densidade superior a do ar atmosférico, deste modo são considerados gases densos.

A maneira como um gás denso se comporta durante a dispersão atmosférica é ilustrada na Figura 2.2. A princípio, a gravidade faz com que o gás se dirija e se concentre nas proximidades do solo. Conforme o gás se move na direção do vento, o contaminante se espalha nas demais direções. Dessa forma, a concentração da nuvem diminui até que sua densidade se aproxime da densidade do ar, e a nuvem passe a ter uma distribuição gaussiana. Isso ocorre quando a densidade do gás denso se torna menor que 10.000 ppm [EPA E NOAA, 2007].

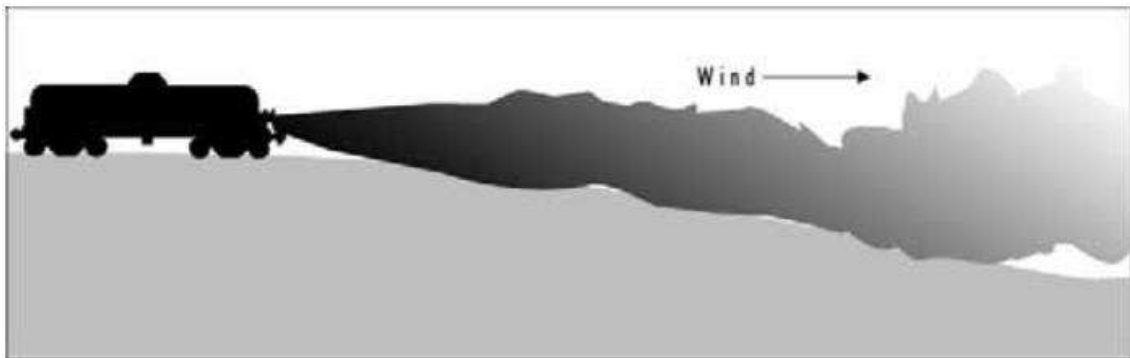


Figura 2.2: Dispersão de um gás denso. Fonte: EPA E NOAA, 2007.

Dentre os diversos modelos de gás denso conhecidos, o ALOHA emprega o modelo DEGADIS [EPA E NOAA, 2007].

Segundo Spicer e Havens [1989], as equações do modelo de DEGADIS são:

$$C(x, y, z) = C_C(x) \exp \left[- \left(\frac{|y| - b(x)}{S_y(x)} \right)^2 - \left(\frac{z}{S_z(x)} \right)^{1+\alpha} \right], \text{ se } |y| > b$$

$$C(x, y, z) = C_C(x) \exp \left[- \left(\frac{z}{S_z(x)} \right)^{1+\alpha} \right], \text{ se } |y| \leq b$$

$$u_x = u_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (\text{Lei de Potência do Vento})$$

Onde:

C é concentração do contaminante (kg/m^3);

C_c é a concentração na linha central da dispersão (kg/m^3);

$|y|$ é o módulo da distância do centro da pluma na direção transversal do vento (m);

b é a metade da largura da seção central horizontalmente homogênea da pluma (m);

S_y são parâmetros horizontais de escala de concentração (m);

S_z são parâmetros verticais de escala de concentração (m);

u_x é a velocidade do vento na direção x (m/s);

u_0 é a velocidade do vento quando $z = z_0$ (m/s);

z_0 é a altura da rugosidade do terreno (m);

α é o coeficiente de cisalhamento da Lei de Potência do Vento;

2.2 Cenários

A liberação de um composto químico perigoso pode ser simulada pelo ALOHA através de quatro diferentes abordagens [EPA E NOAA, 2007]:

- **Direta:** o usuário informa a vazão de vazamento do composto para a atmosfera
- **Poça:** o composto vaza inicialmente na forma líquida, gerando uma poça ou piscina. Haverá evaporação ao longo do tempo.
- **Tanque:** o composto escapa a partir de um tanque ou reservatório. A partir de informações sobre as condições operacionais o software estima a vazão de vazamento.
- **Tubulação de gás:** o composto escapa através de um rompimento em uma tubulação de gás. Novamente, a partir das condições operacionais do processo é estimada a vazão de vazamento.

A tabela 2.4 descreve os possíveis cenários acidentais modelados pelo software para cada abordagem mencionada.

O ALOHA é capaz de modelar cinco cenários envolvendo incêndio e explosão: *Jet fire* (incêndio em jato), *Pool fire* (incêndio em poça ou piscina), BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*), e incêndio em nuvem (*flash fire*), ou explosão de nuvem [EPA E NOAA, 2007]

Tabela 2.4: Fontes e cenários do ALOHA.

Fonte	Cenários de toxicidade	Cenários de Incêndio	Cenários de Explosão
Direta			
Fuga direta	Nuvem de vapor tóxica	<i>Flash fire</i>	Explosão em nuvem
Poça			
Evaporação	Nuvem de vapor tóxica	<i>Flash fire</i>	Explosão em nuvem
Incêndio		<i>Pool fire</i>	
Tanque			
Sem incêndio	Nuvem de vapor tóxica	<i>Flash fire</i>	Explosão em nuvem
Incêndio		<i>Jet fire/Pool fire</i>	
BLEVE		BLEVE	
Tubulação de gás			
Sem incêndio	Nuvem de vapor tóxica	Flash fire	Explosão em nuvem
Incêndio		<i>Jet fire</i>	

Fonte: EPA E NOAA, 2007

2.2.1.1 Cenário de *Jet fire*

Quando uma substância inflamável vaza de maneira rápida de um reservatório é possível haver a formação de um jato. Quando este jato entra em combustão imediatamente após a liberação tem-se a ocorrência de um *jet fire* ou um incêndio em jato. A radiação térmica é um perigo primário relacionado ao *jet fire* e pode ser modelado pelo ALOHA. [EPA E NOAA, 2007].

Os níveis de radiação térmica de referência (LOCs) utilizados na simulação de um cenário de incêndio são valores limites acima dos quais pode haver dano à saúde. O ALOHA sugere três LOCs para um cenário de incêndio, que estão relacionados com o efeito que a radiação produz em pessoas expostas por sessenta segundos [EPA E NOAA, 2007]:

- **Vermelha (10 kW/m²)** : potencialmente letal após sessenta segundos de exposição
- **Laranja (5 kW/m²)** : provoca queimaduras de segundo grau após sessenta segundos de exposição
- **Amarela (2 kW/m²)** : provoca dor após sessenta segundos de exposição

2.2.1.2 Cenário de *Flash fire*

No momento em que uma nuvem inflamável entra em contato com uma fonte de ignição a nuvem pode entrar em combustão e queimar rapidamente. Esse fenômeno é chamado *flash fire* ou incêndio em nuvem [EPA E NOAA, 2007].

Os perigos que envolvem um *flash fire* são radiação térmica, fumaça e subprodutos tóxicos da combustão. O ALOHA pode estimar a área inflamável da nuvem de vapor, isto é, a região da nuvem que pode entrar em combustão quando em contato com uma fonte de ignição [EPA E NOAA, 2007].

A área inflamável é limitada pelo Limite Inferior de Explosividade (LEL) e pelo Limite Superior de Explosividade (UEL). Quando a concentração do combustível na nuvem de vapor está abaixo do LEL, não há combustível suficiente para alimentar o fogo. Por outro lado, quando a concentração do combustível está acima do UEL, existe excesso de combustível, também não havendo queima [EPA E NOAA, 2007].

A concentração de combustível não é constante em uma nuvem de vapor. Para estimar os níveis de concentração, o ALOHA utiliza uma média temporal das concentrações. Em uma nuvem de vapor podem existir regiões em que a concentração está dentro da faixa dos Limites de Explosividade ainda que a média esteja abaixo do LEL. Por esse motivo o ALOHA estabelece 60% do LEL como LOC padrão para a região de ameaça vermelha, e determina 10% do LEL como LOC padrão para região de ameaça amarela [EPA E NOAA, 2007].

2.3 Limitações do ALOHA

Assim como em qualquer programa computacional, a exatidão dos resultados depende das informações fornecidas pelo usuário. De modo que na existência de imprecisão com relação aos valores de entrada, é recomendável que o usuário escolha o valor correspondente ao pior cenário possível, ou que simule variados cenários e compare os resultados [EPA E NOAA, 2007].

Ainda que seja possível ao usuário fornecer informações precisas, existem condições sob as quais os resultados obtidos pelo software não são muito precisos [EPA E NOAA, 2007]:

- **Velocidades de vento muito baixas:** geralmente a direção do vento é mais difícil de ser determinada quanto o vento está a velocidades muito baixas.
- **Condições atmosféricas muito estáveis:** geralmente existe pouco vento, de maneira que a substância liberada quase não se mistura com o ar. Assim a nuvem de vapor pode manter concentrações elevadas por longas distâncias.
- **Variações na direção do vento e obstáculos no terreno:** o ALOHA assume que a direção e a velocidade do vento são constantes, porém obstáculos no terreno podem provocar variações.
- **Valores de concentração muito variantes, especialmente próximo à fonte de vazamento:** frequentemente turbulências são geradas próximo à fonte de vazamento, afetando o perfil de concentração.

Algumas destas condições não caracterizam os cenários simulados nesse trabalho, de modo que não prejudicam a precisão dos resultados dos mesmos. A velocidade do vento nos cenários simulados neste trabalho é de quinze metros por segundo, já a menor velocidade recomendada pelo ALOHA é de um metro por segundo. Além disso, os acidentes simulados ocorrem em regiões de mar aberto, de modo que é válida a hipótese de que a direção e velocidade do vento não são afetadas por obstáculos no terreno.

3 ANÁLISE DE RISCO DE UM SISTEMA DE GÁS COMBUSTÍVEL

3.1 Simulação de um sistema de gás combustível

O processamento primário de petróleo corresponde à primeira etapa da fase de produção e ocorre depois que o petróleo deixa o reservatório e alcança a superfície. Geralmente, a corrente proveniente de um poço de perfuração *offshore* é constituída por água, óleo, gás e impurezas. O principal interesse econômico da atividade consiste na obtenção dos hidrocarbonetos presentes nas fases óleo e gás, de modo que os campos marítimos e terrestres de produção são projetados de modo que suas instalações realizem a separação do óleo, do gás e da água [THOMAS, 2001].

Portanto, uma planta de processamento primário de produção de óleo e gás é composta de: sistema de separação das fases que chegam dos poços, sistema de tratamento de óleo, sistema de tratamento de água e sistema de tratamento e movimentação de gás produzido. Além do mais, uma plataforma ainda possui diversos sistemas e redes de apoio (alívio, drenagem, ar comprimido, diesel, resfriamento e aquecimento, entre outros) e, em geral, sistema de recuperação secundária, como sistema de injeção de água do mar e/ou produzida [VAZ, 2009].

Destaca-se ainda que a água deve ser removida por sua capacidade de formar emulsões com viscosidades superiores à do petróleo desidratado, e hidratos em uma corrente constituída por gás natural, formando depósitos que podem bloquear a tubulação. A remoção de água do petróleo é realizada geralmente em duas etapas: desidratação e dessalgação. A desidratação é realizada nas unidades de processamento primário e consiste na adição de substâncias desemulsificantes com o objetivo de separar a água emulsionada do óleo. Já a dessalgação faz parte do tratamento do óleo nas refinarias e consiste em lavar o petróleo com água para remoção de sais indesejáveis [SANT`ANNA, 2005]. O principal objetivo desta operação está na redução do teor de água emulsionada presente, a fim de adequá-lo às condições de recebimento das refinarias. Além disso, esta etapa elimina do óleo, praticamente, todos os sais e sedimentos presentes na água [BRASIL *et al.*, 2011, *apud*, SIQUEIRA, 2012].

Finalmente, o processamento do gás se baseia em sua compressão, remoção de CO₂ e desidratação com o propósito de utilizá-lo principalmente como gás combustível e *gas lift* nos poços de produção. O gás excedente é exportado através de gasodutos e deve ser enviado a

Unidades de Processamento de Gás Natural – UPGN. Em tais unidades, o gás é desidratado e fracionado, formando metano e etano, que constituem o gás natural combustível – GNC, e propano e butano, que constituem o gás liquefeito de petróleo – GLP, além da “gasolina natural” [SANT`ANNA, 2005].

O gás utilizado como *gas lift* é injetado na base na coluna de produção de forma a assegurar o escoamento. Já a outra parte do gás produzido, chamada gás combustível, é utilizada na própria planta, principalmente para geração de energia elétrica, acionamento de turbocompressores e turbogeradores [VAZ, 2009].

O sistema de gás combustível precisa garantir a especificação do gás que será consumido pela planta, principalmente nas turbinas, uma vez que esses equipamentos são demasiadamente caros, sensíveis e importantes no processo [VAZ, 2009]. Assim, para evitar a condensação nos equipamentos da plataforma, o gás deve ser expandido e especificado para remoção de partículas sólidas e ajuste de ponto de orvalho. A especificação do gás combustível para as turbinas é, de forma geral, de no mínimo 20°C acima de seu ponto de orvalho na pressão de entrada nas turbinas. Esse sistema é comum em todas as unidades *offshore* que produzem sua própria energia [VAZ, 2009].

Segundo Vaz [2009], de uma forma geral, a partida de um sistema de gás combustível ocorre com gás do gasoduto, já que neste momento a planta ainda não está comprimindo gás e não há água quente disponível, uma vez que a principal fonte de calor são os gases exaustos das turbinas. Assim, o sistema é constituído de duas entradas: do gás do gasoduto e do gás proveniente da plataforma após desidratação.

Em sua forma mais simples, um sistema de condicionamento de gás combustível é composto apenas de uma válvula de expansão, um vaso depurador e um aquecedor. Essa estrutura geralmente é utilizada em plataformas próximas da costa ou quando a desidratação do gás ocorre antes do último estágio de compressão. Já quando o gás produzido se encontra em uma pressão mais elevada, o sistema de condicionamento é constituído por válvulas, aquecedores, trocador e um vaso [VAZ, 2009].

O primeiro aquecedor do sistema tem o propósito de evitar temperaturas muito baixas no vaso e assim prevenir da necessidade de materiais especiais. Posteriormente o gás passa por processos de expansão e resfriamento e é enviado para o vaso, onde o condensado é removido. Por fim, o gás é aquecido novamente, principalmente para assegurar que o mesmo não condense ao se expandir na turbina, o que causaria danos ao equipamento [VAZ, 2009].

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma simplificado, proposto por Vaz [2009], de um sistema de condicionamento de gás combustível.

O trocador de calor (P-513501) é do tipo gás-gás e funciona como um recuperador, reduzindo o custo operacional (consumo de utilidades). Em contrapartida, representa um aumento no custo de investimento. Segundo Vaz (2009), os projetos de plataformas de óleo da PETROBRAS, de 1998 a 2007, continham o trocador gás-gás, mas existe a tendência de que não se utilize mais esse equipamento.

A maior parte das plataformas possuem turbinas duais, que podem trabalhar com gás ou óleo diesel. O diesel não é utilizado continuamente no processo, no entanto possui importante utilidade na partida e na ocorrência de falta temporária de gás. Nesse caso, o suprimento de gás durante o tempo necessário para comutação para diesel é garantido pelo vaso depurador (V-513501), cuja principal função consiste em remover o condensado formado no processo de expansão [VAZ, 2009].

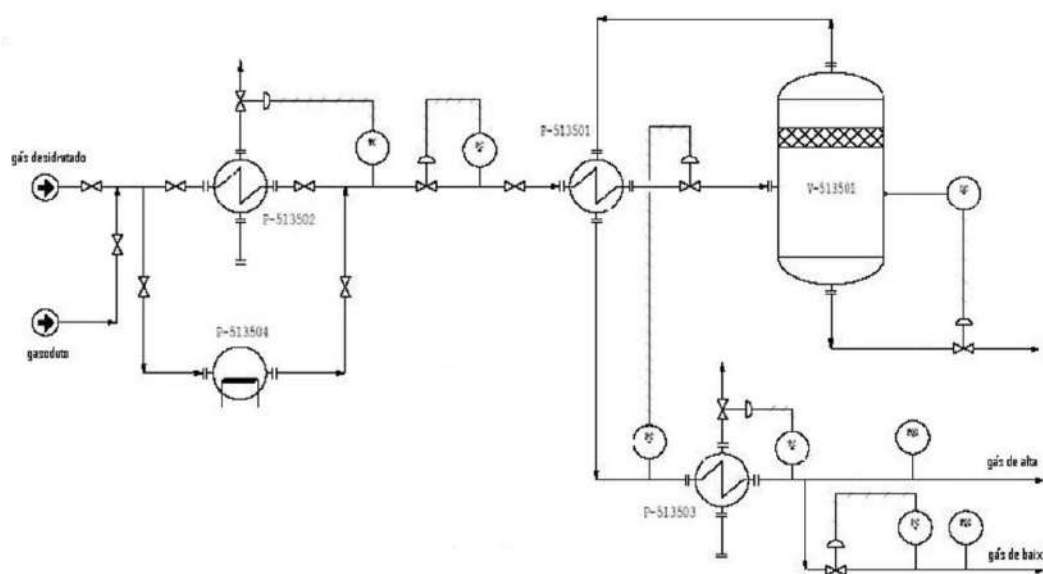


Figura 3.1: Fluxograma simplificado de um sistema de gás combustível. Fonte: VAZ,2009.

Este capítulo descreve de forma sucinta a simulação de um sistema de condicionamento de gás combustível para turbinas. Essa simulação foi realizada por Silva, Santos e Sant'Anna [2015]. A simulação foi desenvolvida no programa HYSYS. Este capítulo apresenta ainda a Análise Preliminar de Risco (APR), também realizada por Silva, Santos e Sant'Anna [2015], para o processo em estudo. Os cenários acidentais analisados nos capítulos seguintes tomam como base a simulação e o APR aqui apresentados.

Na simulação realizada por Silva, Santos e Sant'Anna [2015], o modelo termodinâmico utilizado foi Peng-Robinson. As condições de operação foram retiradas de Vaz [2009], onde os dados correspondiam a situações típicas encontradas em plataformas brasileiras.

De maneira geral, o gás produzido na plataforma é exportado por meio de um gasoduto. Assim, o gás retirado de um gasoduto e utilizado em uma repartida tem composição muito semelhante ao gás produzido. Nesse sentido, as composições das duas correntes de entrada do sistema foram consideradas iguais no trabalho de Vaz [2009]. Essa composição é exibida na Tabela 3.1.

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma da simulação correspondente ao pré-aquecimento do gás combustível. Esta operação garante uma temperatura entre 0°C e 10°C no vaso depurador (V-100), que se encontra na última etapa do sistema e pode ser visto na Figura 3.3. A corrente Entrada-1 entra no sistema a 40°C e 200 kgf/cm² e consiste no gás proveniente da plataforma, enquanto a corrente Entrada-2 se encontra a 5°C e 180 kgf/cm² e se trata de um gás extraído de um gasoduto para repartida. A válvula de alimentação de gás na Entrada-2 (VLV-101), que está sempre aberta, evita o fluxo contrário e abastece o sistema em caso de queda de pressão na unidade, funcionando como válvula de retenção [VAZ, 2009].

Em condições normais de operação, o gás passa pelo Pré-aquecedor, permanecendo o aquecedor elétrico isolado, de maneira que as válvulas VLV-103 e VLV-103-2 permanecem fechadas. As válvulas restantes da operação de pré-aquecimento são de bloqueio e permanecem totalmente abertas ou totalmente fechadas [VAZ, 2009].

Enquanto as vazões de entrada de gás foram retiradas da modelagem de VAZ [2009], a vazão de entrada de água de aquecimento (corrente Água-180) foi especificada por Silva, Santos e Sant'Anna (2015) de maneira que a saída de gás (corrente C-06) permaneça a 65°C e as condições necessárias do sistema sejam atingidas.

O gás pré-aquecido segue para a etapa de expansão e remoção do condensado (Figura 3.3). As válvulas de controle PV-100 e PV-40 são responsáveis pela expansão, reduzindo as pressões a 100 e 40 kgf/cm², respectivamente. O Trocador Gás-Gás permite que o gás da corrente a 100kgf/cm² aqueça a corrente que deixa o vaso depurador (corrente "DoVaso", na figura 3.3). O gás frio da corrente a 40 kgf/cm² passa pelo depurador, onde o condensado é removido [VAZ, 2009].

Tabela 3.1: Composição das correntes de entrada do sistema de gás combustível (% molar)

H₂O 0,0026	N₂ 0,2303	CO₂ 2,8199	Metano 77,6575	Etano 7,5854	Propano 5,8992
i-Butano 2,986	n-Butano 1,1763	i-Pentano 0,3077	n-Pentano 0,4253	n-Hexano 0,2986	n-Heptano 0,3038
n-Octano 0,1798	n-Nonano 0,0691	n-Decano 0,0324	n-C₁₁ 0,0153	n-C₁₂ 0,006	n-C₁₃ 0,0023
n-C₁₄ 0,0013	n-C₁₅ 0,0007	n-C₁₆ 0,0002	n-C₁₇ 0,0002	n-C₁₈ 0,0001	n-C₁₉ 0

Fonte: VAZ, 2009.

Por fim, o gás que deixa o trocador vai para o Aquecedor final, a fim de que sua temperatura seja ajustada a 50°C (Figura 3.4). Este aquecedor serve ainda como um equipamento reserva para o trocador Gás-Gás e fornece uma maior margem de segurança para o sistema, dado o prejuízo causado pela entrada de gás não especificado na turbina [VAZ, 2009].

A partir da simulação do processo realizada no software HYSYS, obtém-se uma série de parâmetros referentes às correntes do processo. Alguns destes parâmetros se encontram na Tabela 3.2.

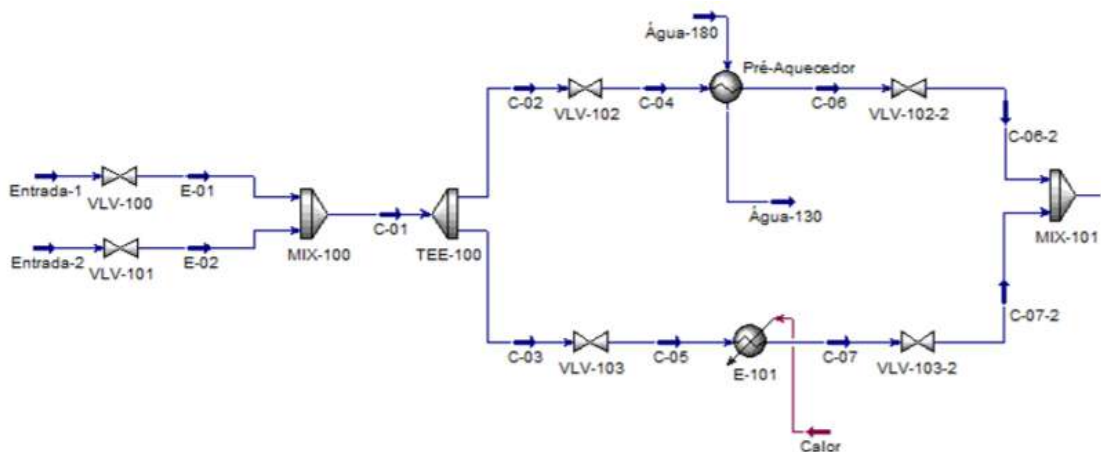


Figura 3.2: Pré-aquecimento do gás. Fonte: VAZ, 2009.

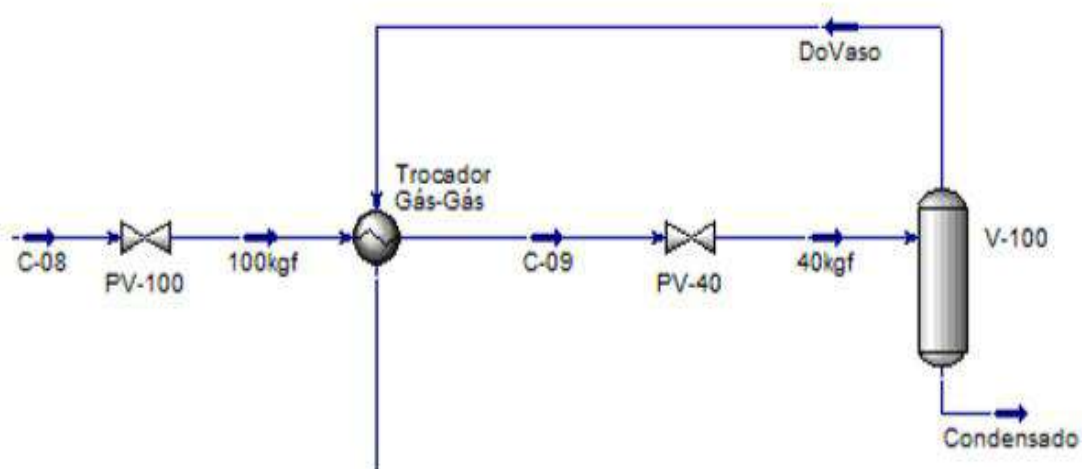


Figura 3.3: Expansão e remoção de condensado. Fonte: VAZ, 2009.

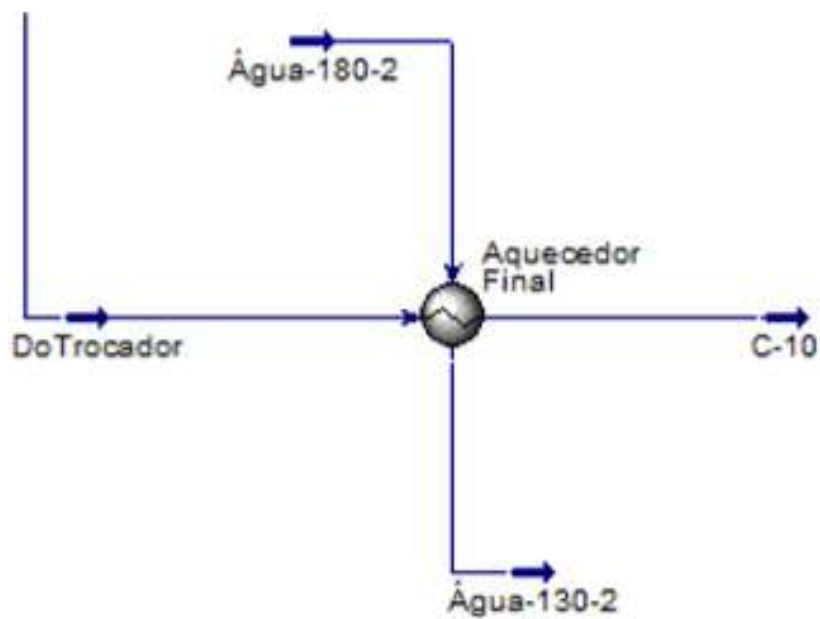


Figura 3.4: Aquecimento Final. Fonte: VAZ, 2009.

Tabela 3.2: Caracterização das correntes.

Corrente	Temperatura (°C)	Pressão	Pressão	Vazão Mássica
		(kPa)	(kgf/cm ²)	(kg/h)
Entrada-1	40	19600	200	6,05E+06
Entrada-2	5	17700	180	6,05E+06
E-01	40	19600	200	6,05E+06
E-02	5	17700	180	6,05E+06
C-01	20,8	17700	180	1,21E+07
C-02	20,8	17700	180	1,21E+07
C-03	20,8	17700	180	0
C-04	20,8	17700	180	1,21E+07
C-05	20,8	17700	180	0
C-06	63	17700	180	1,21E+07
Água-180	180	101	1,03	1,80E+07
Água-130	130	101	1,03	1,80E+07
C-07	60,8	17700	180	0
C-08	63	17700	180	1,21E+07
100kgf	41,4	9810	100	1,21E+07
40kgf	5	3920	40	1,21E+07
DoVaso	5	3920	40	1,04E+07
Condensado	5	3920	40	1,66E+06
C-09	30,5	9810	100	1,21E+07
DoTrocador	23,1	3920	40	1,04E+07
C-10	50,9	3920	40	1,04E+07
Água-180-2	180	120	1,03	7,00E+06
Água-130-2	130	120	1,03	7,00E+06
C-07-2	60,8	17700	180	0
C-06-2	63	17700	180	1,21E+07

Fonte: SILVA; SANTOS; SANT'ANNA, 2015.

3.2 Análise Preliminar de Risco do sistema de gás combustível

A partir dos resultados da simulação, Silva, Santos e Sant'Anna [2015] propuseram uma Análise Preliminar de Riscos (APR) do processo.

A APR foi construída após a identificação dos locais da planta onde os principais cenários acidentais poderiam ocorrer. Para cada cenário foram relacionados possíveis causas, efeitos e categorias de severidade. As categorias de severidade tomaram como base os critérios propostos na Norma Técnica P4.261 CETESB, presentes na Tabela 3.3. Tais critérios levam em consideração a extensão dos danos causados pelos cenários acidentais ao meio ambiente, às instalações e aos seres humanos.

A APR proposta do Silva, Santos e Sant'Anna [2015] encontra-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.3: Categorias de Severidade

Categorias de severidade	Efeitos
I – Desprezível	Nenhum dano ou dano não mensurável.
II – Marginal	Danos irrelevantes ao meio ambiente e à comunidade externa.
III – Crítica	Possíveis danos ao meio ambiente devido a liberações de substâncias químicas tóxicas ou inflamáveis, alcançando áreas externas à instalação. Pode provocar lesões de gravidade moderada na população externa ou impactos ambientais com reduzido tempo de recuperação.
IV – Catastrófica	Impactos ambientais devido a liberações de substâncias químicas, tóxicas ou inflamáveis, atingindo áreas externas às instalações. Provoca mortes ou lesões graves na população externa ou impactos ao meio ambiente com tempo de recuperação elevado.

Fonte: CETESB, 2011

Tabela 3.4: Análise Preliminar de Riscos.

Cenário Acidental	Causas	Efeitos	Cat. Severidade
Pressão alta na corrente 100kgf	Mau funcionamento da válvula PV-100	Ruptura de linhas e equipamentos	III
Pressão alta na corrente C-02	Fechamento indevido da válvula VLV-102	Ruptura da linha C-02 com possibilidade de formação de <i>jet fire</i> ou nuvem.	IV
Pressão alta na corrente 40kgf	Mau funcionamento da válvula PV-40	Ruptura de linhas e equipamentos a partir do vaso V-100	III
Pressão baixa no Aquecedor Final	Fechamento indevido das válvulas VLV-102 e VLV-102-2	Interrupção da geração de energia elétrica para alimentação das turbinas	II
	Ruptura de tubos do Aquecedor Final		II
Pressão baixa na corrente 100kgf	Mau funcionamento da válvula PV-100	Temperatura baixa Trocador Gás-Gás	II
Pressão baixa na corrente C-09	Ruptura de tubos do trocador de calor Gás-Gás	Aumento de pressão dentro do V-100 devido a maior fração de gás gerada com a baixa pressão na corrente de alimentação do vaso	II
Pressão baixa na corrente C-04	Abertura indevida das válvulas VLV-103 e VLV-103-2	Aumento no gasto de energia devido à necessidade da utilização do aquecedor E-101	I
Pressão baixa na corrente C-10	Ruptura da linha devido a um aumento de pressão	Ocorrência de incêndio em <i>jet fire</i> ou nuvem devido ao vazamento de gás	IV
Temperatura alta na corrente C-06	Vazão baixa na corrente C-04 de pré-aquecimento	Danos em equipamentos (linhas e turbinas)	III
Temperatura baixa na corrente C-10	Fornecimento inadequado de água quente para o Aquecedor Final	Condensação de hidrocarbonetos e possíveis danos às Turbinas	II
Temperatura baixa no Trocador Gás-Gás	Mau funcionamento da válvula de controle de temperatura TV-100	Resfriamento da corrente abaixo do suportado pela linha após a expansão do gás, causando fratura do material	II
Vazão alta na corrente C-10	Aumento de pressão no vaso depurador	Ruptura da linha C-10 com possibilidade de formação de <i>jet fire</i> ou nuvem.	IV
Nível baixo no V-100	Ruptura da linha Condensado	Ocorrência de incêndio em <i>jet fire</i> ou nuvem devido ao vazamento de gás pelo fundo do vaso.	IV

Fonte: SILVA; SANTOS; SANT'ANNA, 2015.

4 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS ACIDENTAIS

Foram realizadas simulações no software ALOHA de um dos cenários de maior severidade da APR proposta por Silva; Santos e Sant'Anna [2015], correspondente à ruptura de tubulação na linha C-02.

Nas plantas reais o gás combustível utilizado é uma mistura de hidrocarbonetos. Contudo, o software ALOHA não realiza simulações com misturas complexas, por esse motivo foi escolhida uma única substância que represente a mistura. De acordo com a Norma Técnica P4.261 CETESB, a substância que melhor representa a mistura em questão é o metano.

Após a escolha do metano como substância para representar o vazamento, é necessário fornecer ao ALOHA informações de localização e condições atmosféricas do cenário. Os dados de localização fornecidos por Silva, Santos e Sant'Anna [2015] são referentes a uma plataforma localizada na costa do Rio de Janeiro, conforme Figura 4.1. Para fins de comparação dos resultados das simulações, optou-se por manter essa mesma localização nas simulações aqui realizadas.

Location Input

Enter full location name:

Location is

Is location in a U.S. state or territory ?

In U.S. Not in U.S.

Enter approximate elevation

Elevation is ft m

Enter approximate location

	deg.	min.		
Latitude	<input type="text" value="21"/>	<input type="text" value="15"/>	<input type="radio"/> N	<input checked="" type="radio"/> S
Longitude	<input type="text" value="40"/>	<input type="text" value="02"/>	<input type="radio"/> E	<input checked="" type="radio"/> W

Figura 4.1: Captura de tela do ALOHA com informações de localização da plataforma.

As condições atmosféricas utilizadas por Silva; Santos; Sant'Anna [2015] foram escolhidas para simular condições típicas de uma plataforma. A velocidade do vento utilizada foi de 15 metros por segundo. Os autores justificaram essa escolha por se tratar da máxima velocidade de vento permitida para pouso de helicópteros em plataformas no Brasil. A altura de medição do vento utilizada, 105 metros, foi o valor da altura aproximada de uma plataforma, segundo os autores. Além disso, é necessário fornecer ao ALOHA informações meteorológicas, como temperatura do ar, classe de estabilidade atmosférica de Pasquill e umidade do ar [SILVA; SANTOS; SANT'ANNA, 2015]. Novamente, para fins de permitir uma melhor comparação dos resultados, optou-se por usar neste trabalho os mesmos dados meteorológicos. Para tais dados, os autores adotaram valores de referência fornecidos pela Norma Técnica CETESB P4.261, os quais podem ser utilizados quando os dados das estações meteorológicas não estiverem disponíveis. Esses dados estão resumidos na Tabela 4.1.

Nas figuras 4.2 e 4.3 é possível observar as telas do ALOHA correspondentes às características atmosféricas aqui utilizadas.

Tabela 4.1: Parâmetros Meteorológicos recomendados pela Norma CETESB P4.261.

Parâmetros	Diurno	Noturno
Temperatura ambiente média (°C)	25	20
Categoria de estabilidade atmosférica de Pasquill	C	E
Umidade relativa média do ar (%)	80	80

Fonte: CETESB, 2011.

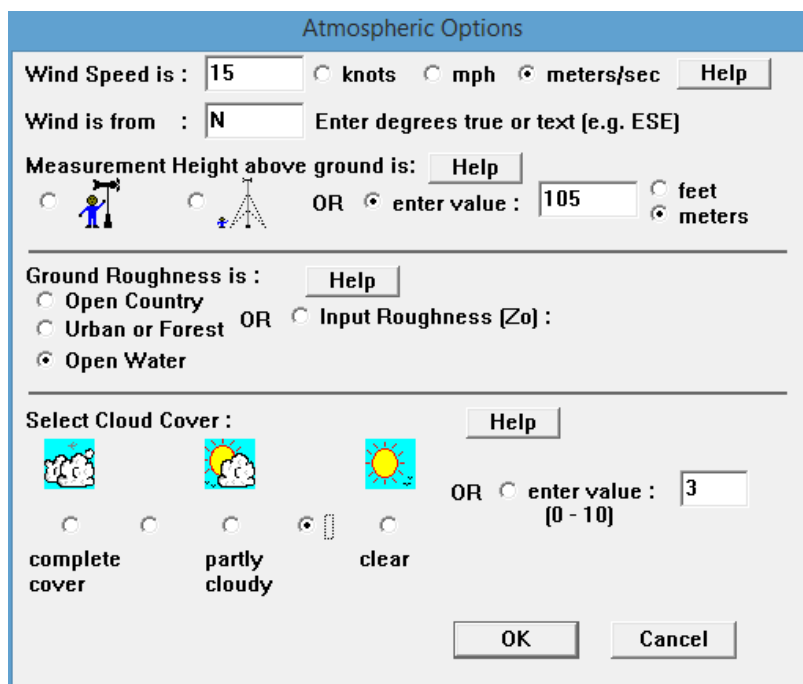


Figura 4.2: Captura de tela do ALOHA com características atmosféricas parte 1.

Neste trabalho, foram realizadas num primeiro momento simulações de cenários envolvendo incêndio (*jet fire*). Posteriormente, foram realizadas simulações envolvendo vazamentos com dispersão atmosférica.

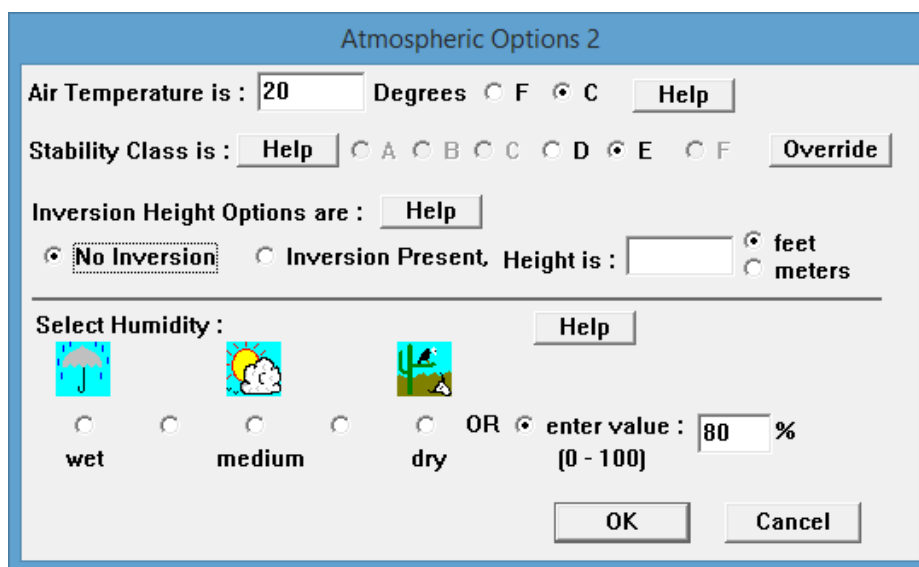


Figura 4.3: Captura de tela do ALOHA com características atmosféricas parte 2.

4.1 Simulação de Cenários envolvendo *jet fire*

Para cada simulação de cenário acidental a ser realizada no ALOHA é necessário especificar a origem do vazamento. Entre as opções de fonte disponíveis no software estão: direta (“*direct*”), tanque (“*tank*”), poça (“*puddle*”), e duto (“*gas pipeline*”). A opção escolhida neste caso foi “*gas pipeline*”, por tratar de rompimento em uma tubulação de gás. Na sequência, o ALOHA exige que se informe se o gás escapa queimando ou não, como pode ser visto na figura 4.4. Nas primeiras simulações, como se trata de um estudo de cenários de *jet fire*, é especificado que o gás entra em combustão logo após ter sido liberado. Caso estivesse sendo analisado um cenário de formação de nuvem inflamável ou tóxica (dispersão atmosférica), optaria-se pela não queima instantânea.

Para modelar esse tipo de cenário o software precisa ainda das dimensões da tubulação, conforme Figura 4.5. O diâmetro escolhido por Silva; Santos; Sant’Anna, [2015] foi 16 polegadas. Segundo os autores, de uma forma geral os gasodutos principais possuem entre 16 e 42 polegadas, enquanto que as ramificações possuem entre 6 e 16 polegadas [RIGOLIN, 2007, *apud*, SILVA; SANTOS; SANT’ANNA, 2015]. Já com relação ao comprimento da tubulação, o valor foi escolhido de acordo com as recomendações do

ALOHA, que afirma que o comprimento de uma tubulação deve ser no mínimo 200 vezes maior que o diâmetro, nesse caso 81,28 metros. A recomendação pode ser vista na Figura 4.6.

Ainda na Figura 4.5 é possível observar que o ALOHA possui duas opções relacionadas à tubulação. Na primeira hipótese uma das extremidades está ligada a um tanque de grandes dimensões, abastecendo o vazamento de forma “infinita”. Ou seja, o tanque funciona como um reservatório infinito, não tendo sua pressão afetada em função da quantidade vazada. Na segunda hipótese o estudo ocorre sobre um trecho finito de tubulação, cuja quantidade de material armazenado é limitada.

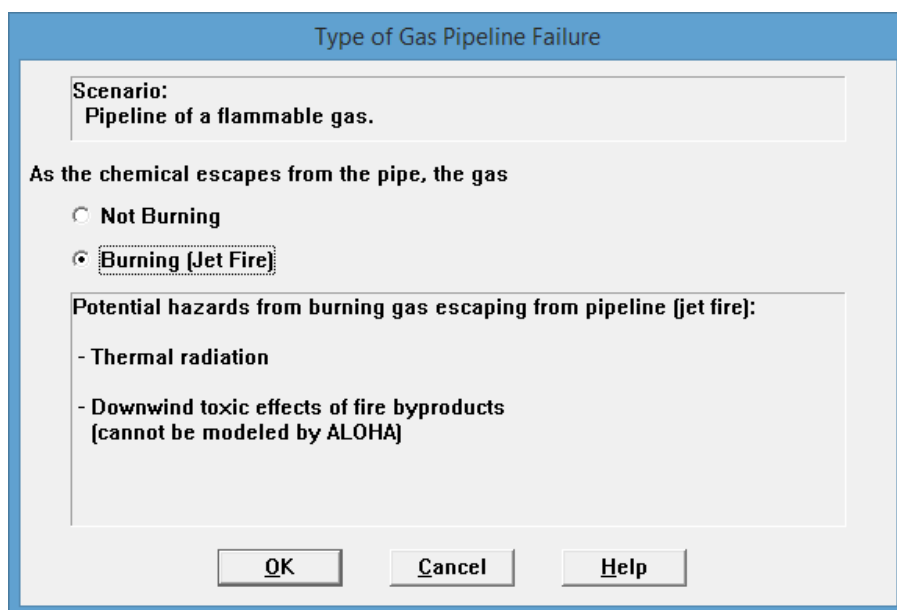


Figura 4.4: Captura de tela de especificação do tipo de falha.

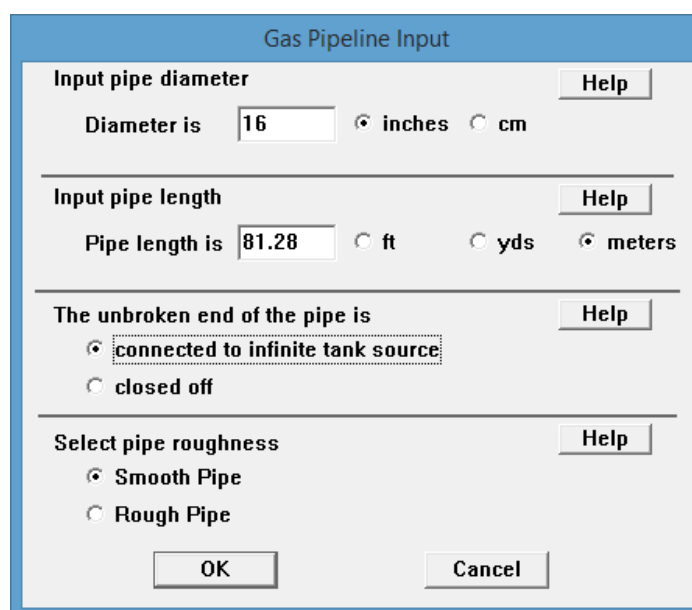


Figura 4.5: Captura de tela com especificações da tubulação.

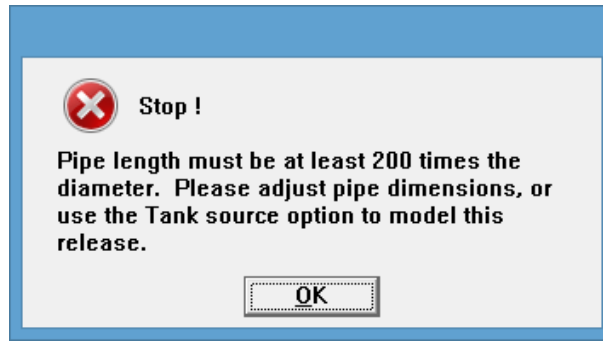


Figura 4.6: Recomendação do ALOHA para comprimento de gasoduto.

4.1.1 Simulação de Rompimento Total da Tubulação

Nessa seção foram realizadas as mesmas simulações de Silva; Santos; Sant'Anna [2015] para os casos de *jet fire* devido a rompimento da tubulação C-02. A simulação foi realizada considerando que a tubulação está ligada a um tanque em uma de suas extremidades. Após preencher as informações relativas à dimensão e disposição da tubulação, uma janela referente à pressão e temperatura dentro do gasoduto é exibida (Figura 4.7). Nesta janela é observado que a única opção disponibilizada pelo software para tamanho do furo é que este seja do tamanho do diâmetro do tubo. Ou seja, trata-se de um cenário envolvendo o rompimento total da tubulação. Com relação à temperatura e pressão dentro do tubo, foram utilizados os dados obtidos na simulação realizada por Silva; Santos; Sant'Anna [2015] para a linha C-02, ou seja, foram adotados 20,8°C e 17700 kPa.

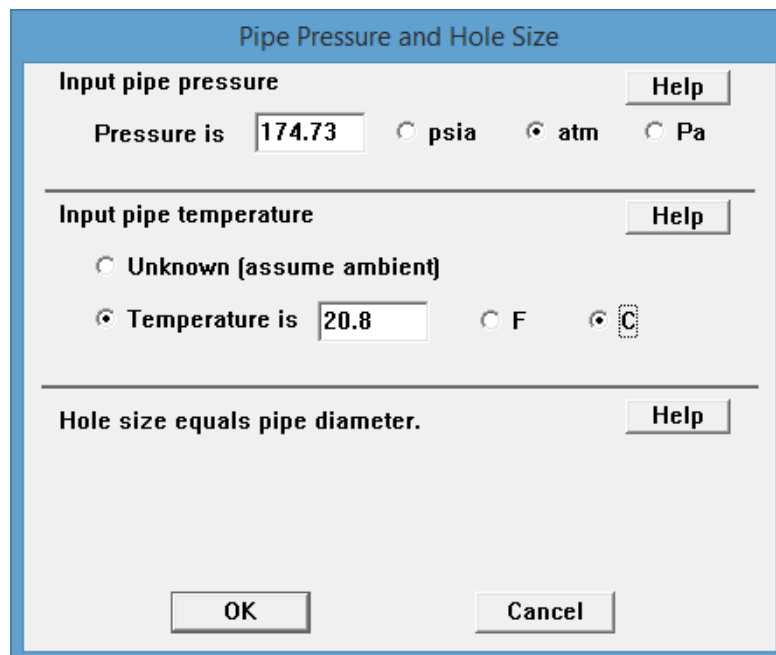


Figura 4.7: Captura de tela com especificações de pressão, temperatura e dimensão do furo.

A partir destas condições o ALOHA é capaz de simular os efeitos do *jet fire* sobre a vizinhança, especialmente em relação a radiação térmica emitida. Os resultados da simulação se encontram na Figura 4.8, e um gráfico que representa a área de ameaça de radiação térmica de um *jet fire* nas condições anteriormente determinadas pode ser visto na Figura 4.9.

A região amarela apresenta um raio de cerca de 600 metros. Uma exposição de 60 segundos à radiação térmica nessa região (cor amarela) pode causar dor. Já a região laranja se prolonga por 384 metros a partir da origem do vazamento. Um indivíduo desprotegido nessa região por mais de 60 segundos pode sofrer queimaduras de segundo grau. Finalmente, uma permanência de mais de 60 segundos na região vermelha é potencialmente letal para indivíduos não protegidos. A região vermelha apresenta um raio de 275 metros a partir da fonte.

Os resultados da simulação informam ainda que a altura máxima de chama é de 50 metros, a taxa máxima de combustão é de 232.000 kg/min e a quantidade queimada é 8.142.800 quilos.

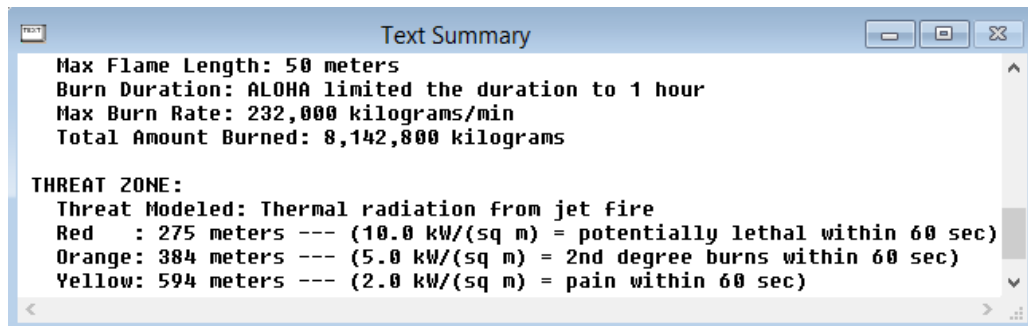


Figura 4.8: Resultados da simulação de *jet fire* para rompimento total da linha C-02.

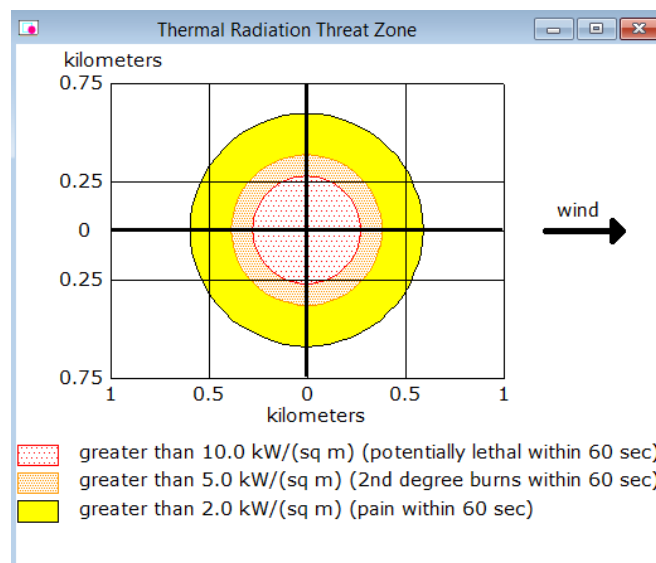


Figura 4.9: Zonas de ameaça para *jet fire* em rompimento total da linha C-02.

As dimensões reais de uma plataforma são aproximadamente de 300 metros de comprimento e 50 metros de largura (Portal Brasil, 2010), sendo portanto a área aproximada da plataforma igual a 15.000 metros quadrados. Considerando que a área de extensão das zonas de ameaça por radiação térmica pode ser assumida como circular, é possível fazer uma proporção do alcance dos danos causados.

A zona amarela apresenta uma extensa área de 1.108.466 m², correspondente a 7389% de uma plataforma. A zona laranja, com 436.247 m², equivale a 3088% da área de uma plataforma. Já a zona vermelha apresentou 237.583 m², que equivale a 1584% da área de uma plataforma. Ou seja, os danos causados por ruptura total da linha C-02 com formação de *jet fire* seriam catastróficos, formando uma zona de ameaça letal que ultrapassa enormemente os limites de área da plataforma. Isso pode estar relacionado ao fato deste cenário corresponder a um vazamento extremamente severo, causado pelo rompimento total de uma tubulação com elevada pressão. Soma-se ao grande diâmetro de furo, a condição imposta pelo software de que a tubulação está ligada a um “reservatório infinito”. Por esse motivo a taxa de combustão permanece constante ao longo do vazamento, conforme figura 4.10.

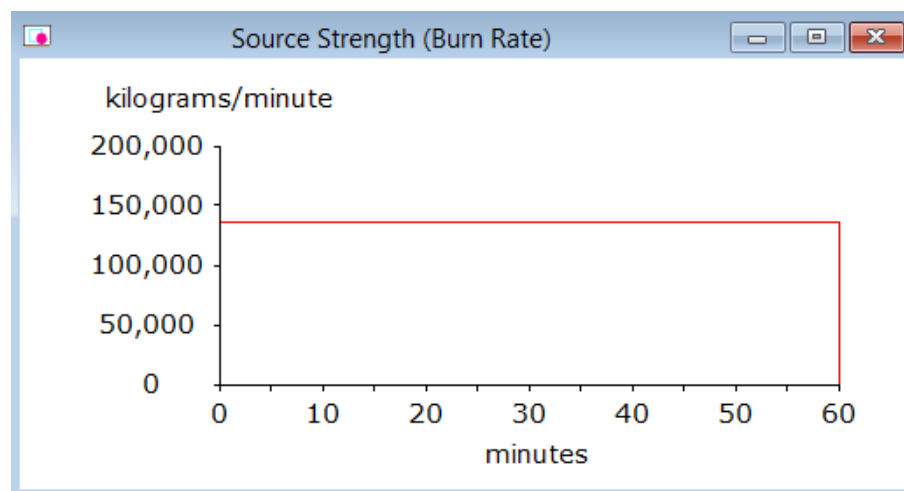


Figura 4.10: Comportamento da taxa de combustão no tempo para *jet fire* com rompimento total da tubulação.

Com o objetivo de avaliar cenários menos extremos, foram realizadas simulações para furos de pequenos diâmetros, ou seja, situações onde não ocorre o rompimento total da tubulação. Embora menos severos, tais cenários são mais críveis, sendo portanto de interesse.

4.1.2 Simulação de Furo na Tubulação

Novamente, para efeitos de comparação, as simulações deste item foram realizadas nas mesmas condições atmosféricas adotadas anteriormente. Foi adotado o modelo de fonte

“gas pipeline” no ALOHA, e as mesmas dimensões de tubulação empregadas no item anterior (Figura 4.11).

Em relação à simulação realizada no item anterior, a alteração é em relação à configuração da tubulação no software. Neste caso, a tubulação, ao invés de estar em contato com um reservatório infinito, estará fechada. Feita essa escolha, se torna possível simular no ALOHA um vazamento com diâmetro de furo ajustável, ou seja, um cenário diferente, e mais crível, do que o rompimento total da tubulação. Essa configuração é ilustrada na Figura 4.12 (“hole area”). As dimensões do tubo, assim como a temperatura e a pressão adotadas, foram as mesmas do cenário anterior.

Foram simulados vazamentos com furos entre 0.2 e 1 cm de raio. Os resultados para a simulação de um *jet fire* gerado a partir de um vazamento em um furo de 0.2 cm de raio, isto é, 0.126 cm² de área, estão na figura 4.13.

A região no entorno do *jet fire* afetada pela radiação térmica ficou menor que 10 metros. Deste modo, as áreas de ameaça não foram representadas pelo ALOHA. Obteve-se que a taxa máxima de combustão é de 22.5 kg/min e a quantidade queimada é 816 kg. Nesse cenário o resultado foi incipiente quando comparado ao caso anterior. Isso se deve principalmente ao fato de que o tamanho do furo é significativamente menor.

Gas Pipeline Input

Input pipe diameter Help

Diameter is inches cm

Input pipe length Help

Pipe length is ft yds meters

The unbroken end of the pipe is Help

connected to infinite tank source
 closed off

Select pipe roughness Help

Smooth Pipe
 Rough Pipe

OK Cancel

Figura 4.11: Captura de tela com especificações da tubulação.

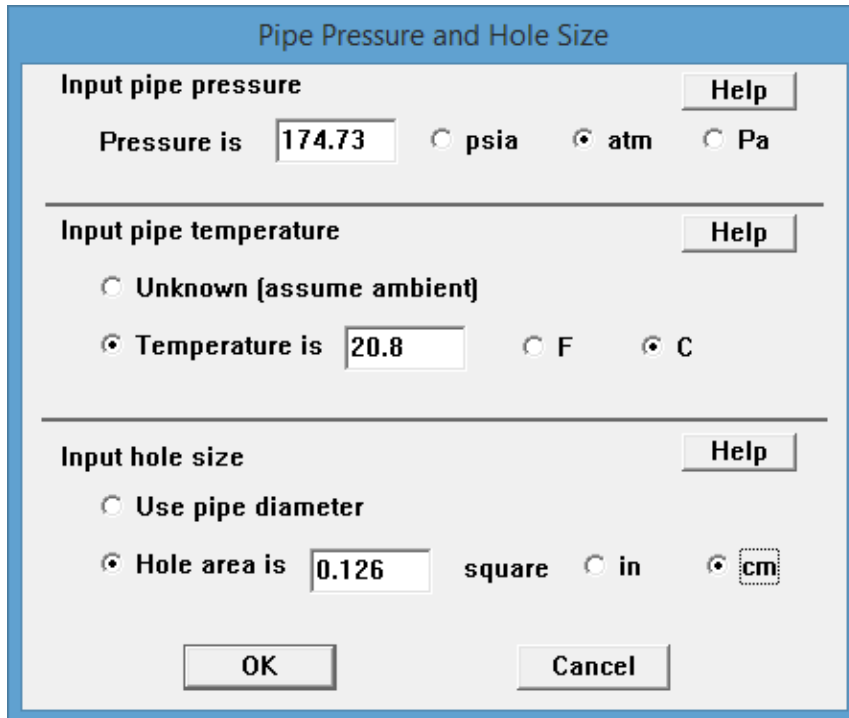


Figura 4.12: Captura de tela com especificações de pressão, temperatura e dimensão do furo.

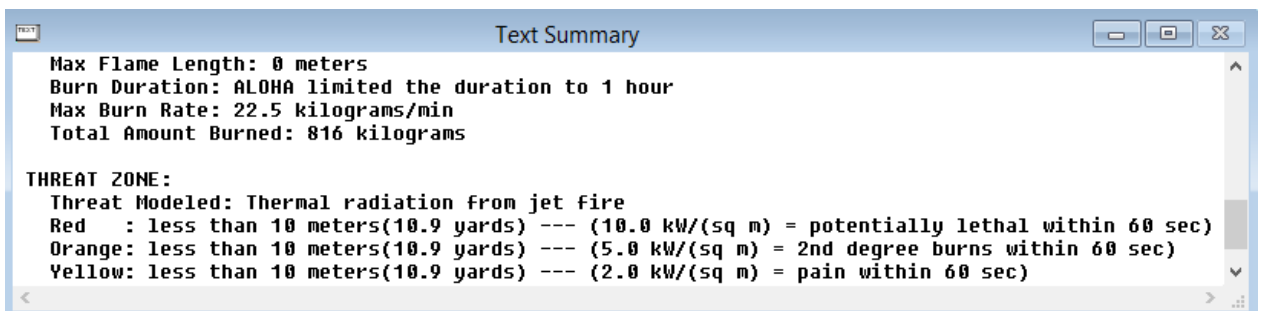


Figura 4.13: Resultados da simulação de *jet fire* para rompimento da linha C-02 com furo de 0.2cm de raio.

Os resultados para a simulação com um furo de 0.5 cm de raio se encontram na Figura 4.14. A altura máxima de chama foi estimada em 1 m. A massa total queimada foi de 1.217 kg, onde a taxa máxima de combustão foi de 140 kg/min. Com o aumento do furo ocorre também aumento da radiação térmica liberada. Logo, observa-se um aumento do raio das zonas de ameaça. As áreas de ameaça que superaram 10 metros foram: laranja, com raio de 11 metros; e amarela, com raio de 17 metros, como pode ser observado na Figura 4.15. Conforme explicado anteriormente, a zona de ameaça amarela tem o potencial de causar dor em pessoas expostas, sem proteção, por mais de 60 segundos. Já a zona laranja tem o potencial de causar queimaduras de segundo grau sob as mesmas circunstâncias. A zona de ameaça vermelha foi muito pequena (menos de 10 metros), não sendo representada pelo ALOHA.

A zona amarela apresentou uma área de 908 m², o que representa 6,05% de uma plataforma. Enquanto a zona laranja possui 380 m², área correspondente a 2,5% de uma plataforma.

Os resultados para a simulação com um furo de 0.8 cm de raio se encontram na Figura 4.16. A altura máxima de chama é de 1 m. A quantidade total queimada é de 1.218 kg e a taxa de combustão máxima é de 359 kg/min. De forma análoga ao caso anterior, o aumento do furo foi acompanhado por um aumento na liberação de radiação térmica. Além de um aumento nas zonas de ameaça amarela e laranja, houve o aparecimento da zona de ameaça vermelha. A zona vermelha tem potencial de causar morte em pessoas não protegidas e expostas por mais de 1 minuto. As zonas estão representadas na Figura 4.17, onde a zona amarela possui raio de 28 metros, a laranja, de 18 metros e a vermelha, de 13 metros.

A zona amarela apresentou uma área de 2.463 m², equivalente a 16,4% de uma plataforma. A zona laranja possui uma área de 1.018 m², representando 6,8% da área de uma plataforma. Já a zona vermelha alcançou uma área de 531 m², que corresponde a 3,5% de uma plataforma.

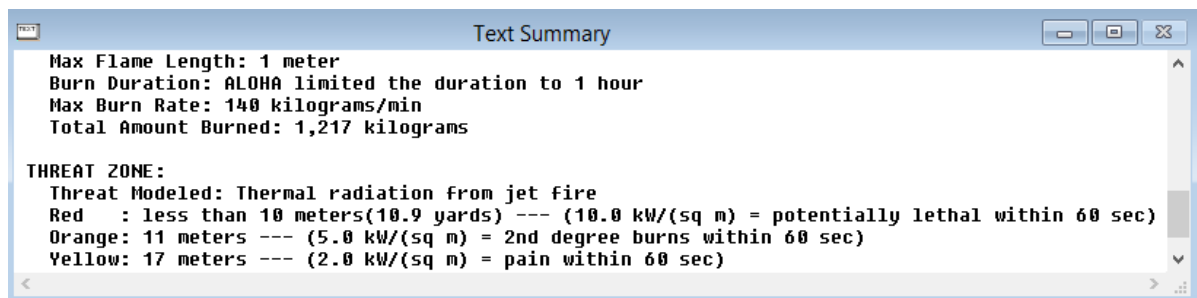


Figura 4.14: Resultados da simulação de *jet fire* para rompimento da linha C-02 com furo de 0.5 cm.

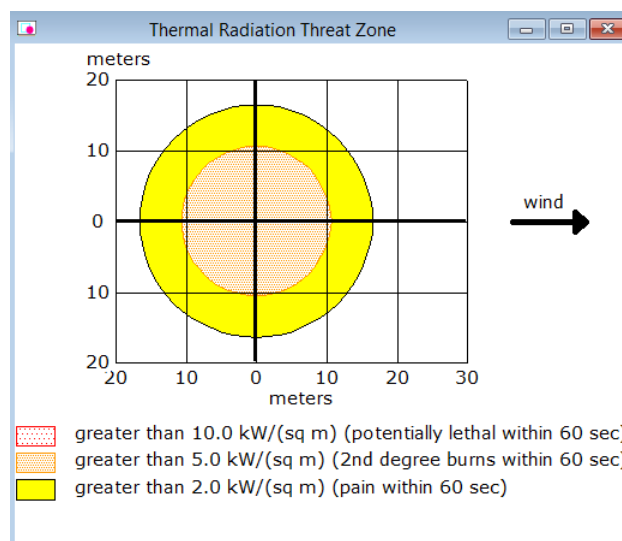


Figura 4.15: Zonas de ameaça para *jet fire* a partir de um furo de 0.5 cm de raio.

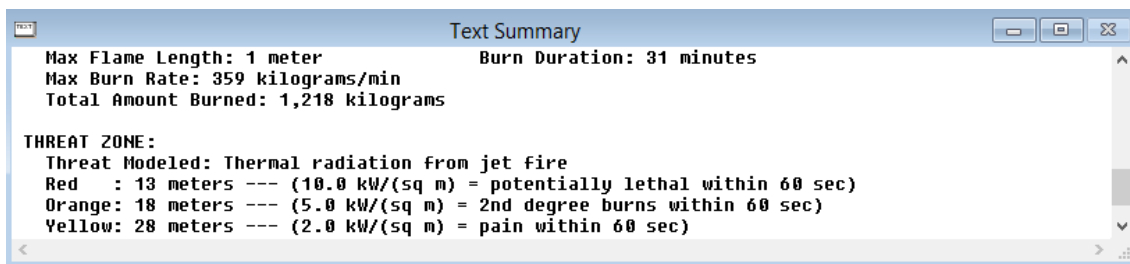


Figura 4.16: Resultados da simulação de *jet fire* para rompimento da linha C-02 com furo de 0.8 cm.

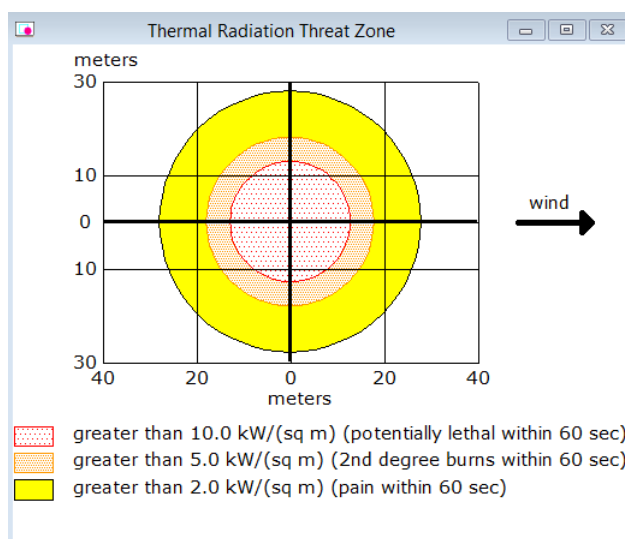


Figura 4.17: Zonas de ameaça para *jet fire* a partir de um furo de 0.8 cm de raio.

Finalmente, os resultados para a simulação com um furo de 1 cm de raio se encontram na Figura 4.18. A quantidade total queimada é de 1.218 kg e a taxa máxima de combustão é de 561 kg/min. Com o aumento do raio, os danos foram ligeiramente maiores. As áreas de ameaça modeladas foram a amarela, com raio de 35 metros, a laranja, com raio de 23 metros, e a vermelha, com 16 metros, conforme Figura 4.19.

Neste caso a zona amarela apresentou uma área de 3.849 m² (25,7% da plataforma). A zona laranja apresentou área de 1.662m² (11,8% da plataforma). Já a zona vermelha possui 804 m² (5,4% da plataforma).

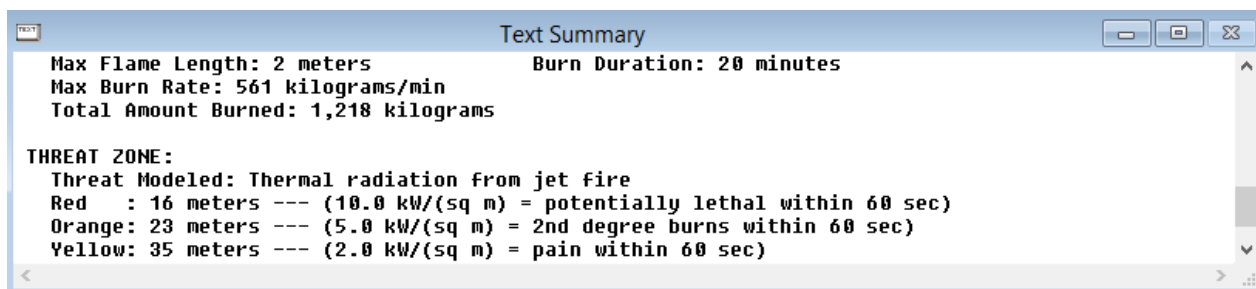


Figura 4.18: Resultados da simulação de *jet fire* para rompimento da linha C-02 com furo de 1 cm.

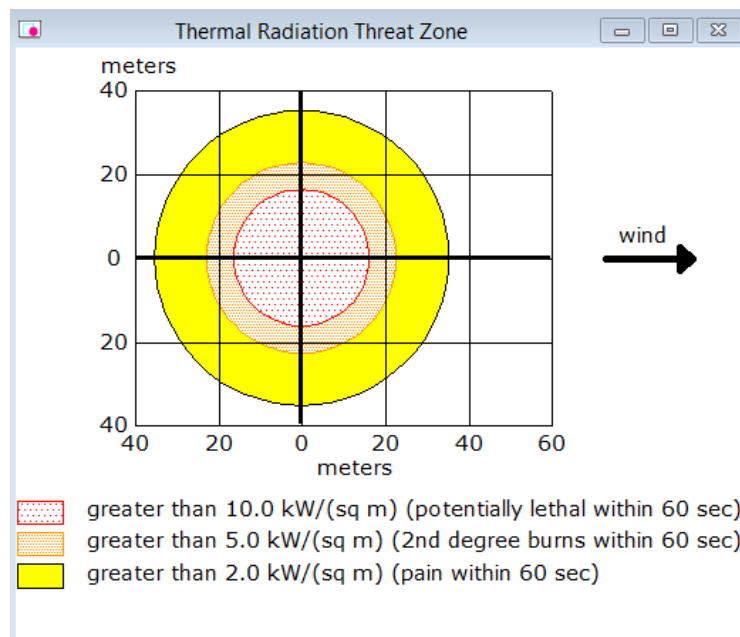


Figura 4.19: Zonas de ameaça para *jet fire* a partir de um furo de 1 cm de raio.

A Tabela 4.2 resume os resultados obtidos para os raios das zonas de ameaça em função dos raios de furo.

Tabela 4.2: Raios das zonas de ameaça em função dos raios de furo.

Zonas	Raios do Furo (cm)			
	0,2	0,5	0,8	1
Amarela	< 10 m	17 m	28 m	35 m
Laranja	< 10 m	11 m	18 m	23 m
Vermelha	< 10 m	< 10 m	13 m	16 m

No item anterior, onde foi simulado o caso de rompimento total da tubulação, o software assumiu que o tubo estava conectado em um reservatório infinito. Ou seja, o vazamento não promovia uma redução no diferencial de pressão ao longo do tempo. Por outro lado, para simular pequenos furos, como desenvolvido neste item, o software exige que se assumam um tubo fechado com dimensões definidas. Ou seja, o gás vaza de um reservatório com dimensões finitas. Logicamente, dependendo das dimensões desse reservatório e da quantidade vazada, a pressão interna irá cair rapidamente, e a vazão de vazamento será reduzida ao longo do tempo. Trata-se por tanto de importante diferença em relação ao item anterior.

Com o objetivo de avaliar este efeito, e consequentemente verificar a influência que as dimensões do tubo têm nos resultados finais, foram realizadas simulações nas mesmas

condições anteriores em um tubo com diâmetro e comprimento 20 vezes superiores (Figura 4.20). Ou seja, em um tubo com volume 8000 vezes maior. Buscou-se assim criar um reservatório “infinito” para cenários de furo de diâmetro reduzido, ultrapassando uma limitação do ALOHA.

The screenshot shows a dialog box titled "Gas Pipeline Input". It has four main sections, each with a "Help" button to its right. The first section, "Input pipe diameter", has a text box with "320" and radio buttons for "inches" (selected) and "cm". The second section, "Input pipe length", has a text box with "1625.6" and radio buttons for "ft", "yds", and "meters" (selected). The third section, "The unbroken end of the pipe is", has radio buttons for "connected to infinite tank source" and "closed off" (selected). The fourth section, "Select pipe roughness", has radio buttons for "Smooth Pipe" (selected) and "Rough Pipe". At the bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

Figura 4.20: Captura de tela com especificações da tubulação.

Para as simulações que se seguem foram utilizados os mesmos tamanhos de furo empregados anteriormente.

Para a simulação com furo 0.2 cm de raio, os resultados se encontram na Figura 4.21. Ainda que com dimensões do tubo aumentadas 8.000 vezes em volume, nenhuma das áreas de ameaça térmica neste vazamento atingiu 10 metros e assim não foram representadas pelo ALOHA. Este resultado é análogo àquele obtido para o tubo com dimensões menores e mesmo tamanho de furo.

The screenshot shows a window titled "Text Summary" with a text area containing the following information:
Flame Length: 0 meters
Burn Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour
Burn Rate: 22.5 kilograms/min
Total Amount Burned: 1,350 kilograms

THREAT ZONE:
Threat Modeled: Thermal radiation from jet fire
Red : less than 10 meters(10.9 yards) --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)
Orange: less than 10 meters(10.9 yards) --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)
Yellow: less than 10 meters(10.9 yards) --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

Figura 4.21: Resultados da simulação de *jet fire* para rompimento da linha C-02 com furo de 0.2 cm.

Os resultados para a simulação com um furo de 0.5 cm se encontram na Figura 4.22. A altura máxima de chama é de 1 m. A quantidade total queimada é de 8.411 kg com uma taxa de combustão de 140 kg/min. As zonas de ameaça modeladas foram a amarela, com 17 metros de raio e a laranja, com 11 metros de raio, como representado na Figura 4.23. Comparando com o cenário de mesmo tamanho de furo e tubulação menor, apenas a quantidade queimada é maior. As dimensões da zona afetada permanecem a mesma nos dois casos. Portanto a dimensão da tubulação não influenciou significativamente na porcentagem de área atingida na plataforma.

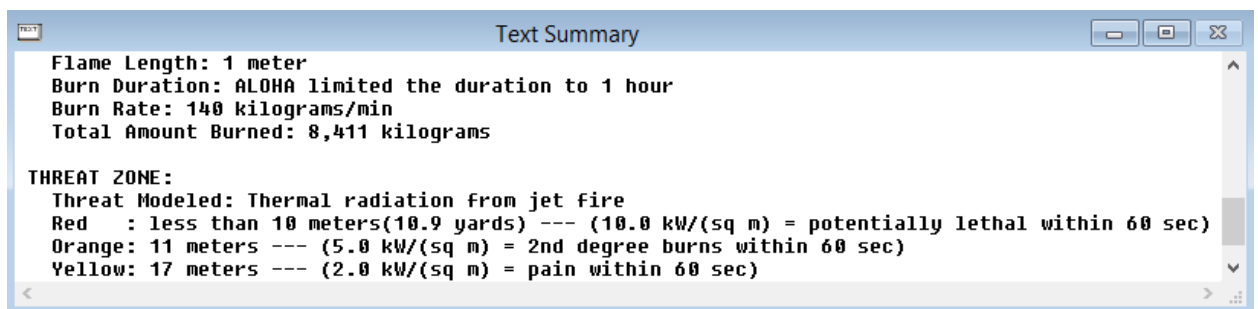


Figura 4.22: Resultados da simulação de *jet fire* para rompimento da linha C-02 com furo de 0.5 cm.

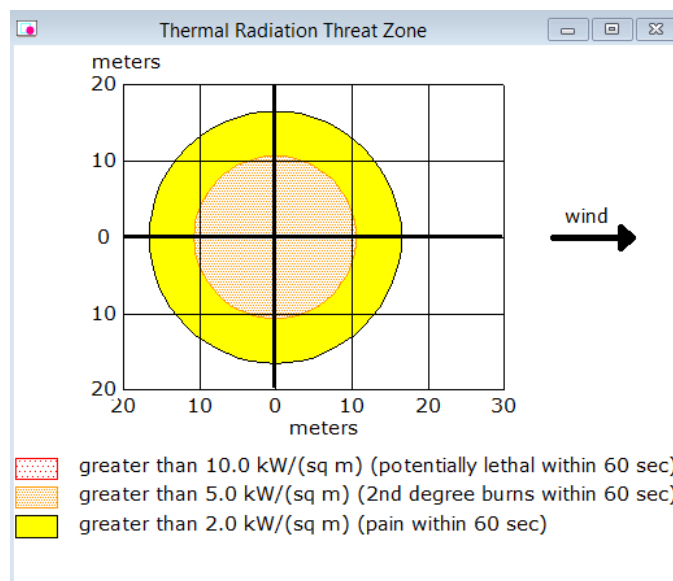


Figura 4.23: Zonas de ameaça para *jet fire* a partir de um furo de 0.5 cm de raio.

Os resultados para a simulação com um furo de 0.8 cm se encontram na Figura 4.24. A altura máxima de chama é de 1 m. A quantidade total queimada é de 21.512 kg com uma taxa de combustão de 359 kg/min. As áreas de ameaça modeladas foram a amarela, com raio de 29 metros e a amarela, com raio de 18 metros e a vermelha com 13 metros, conforme Figura 4.25. Comparando com o resultado obtido na simulação para furo 0.8cm e dimensão de tubulação menor, houve um aumento de um metro no raio da zona amarela. Enquanto no caso

da tubulação menor, a zona amarela afeta 16,4% da plataforma, nesse caso a zona amarela afeta 17,6% da plataforma. Apesar do volume da tubulação ser 8.000 vezes maior, foi gerado um aumento pouco significativo nas dimensões da zona afetada.

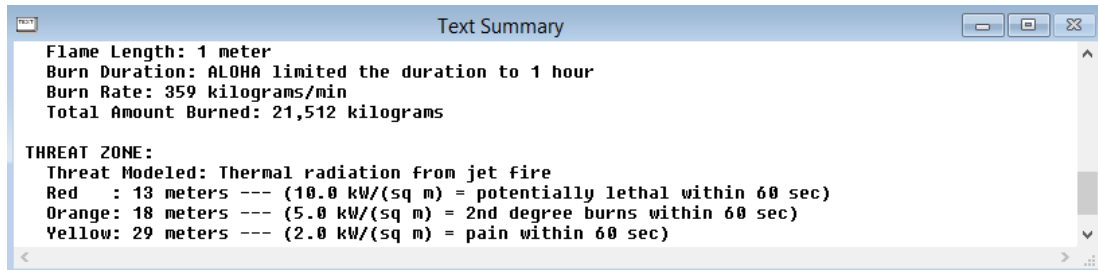


Figura 4.24: Resultados da simulação de *jet fire* para rompimento da linha C-02 com furo de 0.8 cm.

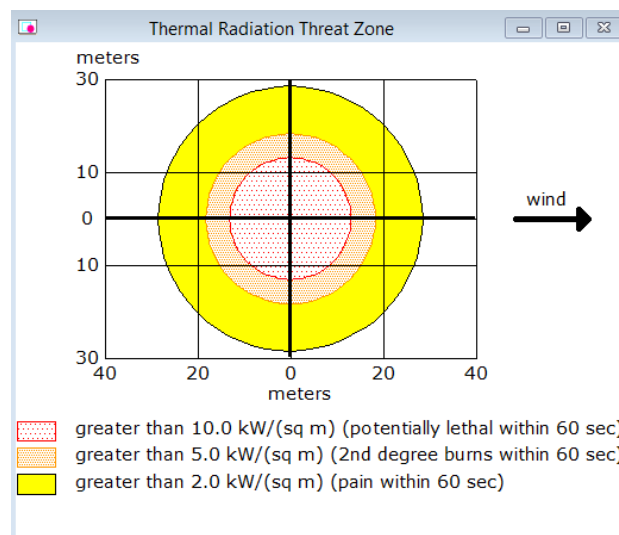


Figura 4.25: Zonas de ameaça para *jet fire* a partir de um furo de 0.8 cm de raio.

Os resultados para a simulação com um furo de 1.0 cm se encontram na Figura 4.26. A altura máxima de chama é de 2 m. A quantidade total queimada é de 33.602 kg com uma taxa de combustão de 561 kg/min. As áreas de ameaça modeladas foram a amarela, com 37 metros de raio, a laranja, com raio de 24 metros e a vermelha, com raio de 17 metros, como pode ser observado na Figura 4.27. Nesse caso, houve um aumento em todas as zonas de ameaça, quando comparadas com as zonas geradas no cenário simulado com mesmo tamanho de furo e dimensões de tubulação menor. Enquanto a zona amarela aumentou em dois metros, as zonas laranja e vermelha aumentaram em um metro cada. A área da plataforma correspondente à zona amarela passou de 27,5% para 28,7%, correspondente à zona laranja passou de 11,8% para 12,1%, já com relação à zona vermelha, passou de 5,4% para 6,05%.

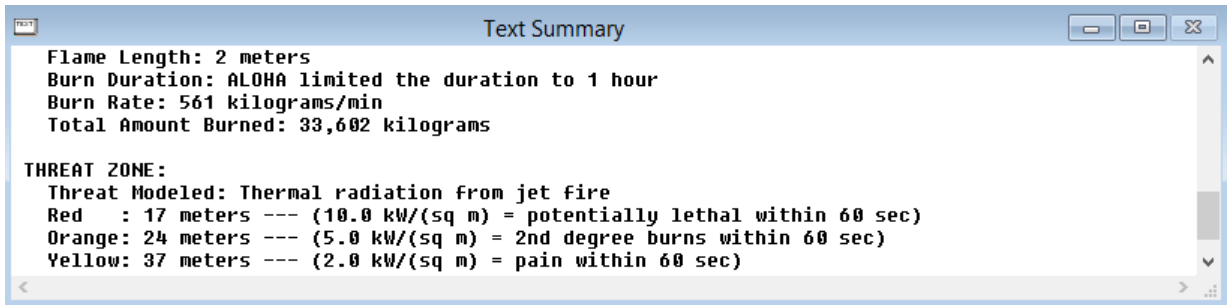


Figura 4.26: Resultados da simulação de *jet fire* para rompimento da linha C-02 com furo de 1.0 cm.

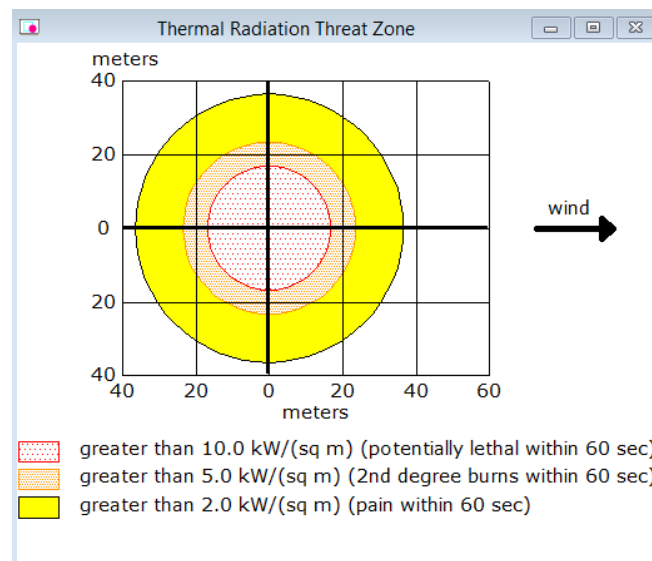


Figura 4.27: Zonas de ameaça para *jet fire* a partir de um furo de 1.0 cm de raio.

A partir dessa comparação é possível perceber que o aumento das dimensões do tubo não se mostrou um fator determinante na alteração das dimensões de zonas de ameaça para esses raios de furo, tendo em vista que o aumento nas zonas de ameaça foi pequeno.

Para diâmetros maiores de furo parece existir alguma redução da pressão interna ao longo do tempo, o que se reflete numa redução na vazão de vazamento. Foi possível perceber que a importância desse fator no tamanho das zonas de ameaça aumentou a medida que o raio do furo aumenta. Isso pode ser observado na Tabela 4.3, que resume as áreas das zonas de ameaça em função dos raios de furo e tamanho de tubulação. Nesta tabela denomina-se de “A” o menor tamanho de tubulação, e de “B” o tamanho de tubulação 8.000 vezes maior em volume.

Finalmente, com o objetivo de avaliar como a vazão de vazamento se comporta ao longo do tempo para reservatórios finitos, foram realizadas simulações com diferentes comprimentos de tubo. O diâmetro de tubo e o tamanho de furo permaneceram fixos em 16 polegadas e 0.5 cm de raio, respectivamente.

Tabela 4.3: Raios das zonas de ameaça em função dos raios de furo e tamanho de tubulação

Tamanho de tubulação	Zonas	Raios do Furo(cm)			
		0,2	0,5	0,8	1
A	Amarela	< 10 m	17 m	28 m	35 m
	Laranja	< 10 m	11 m	18 m	23 m
	Vermelha	< 10 m	< 10 m	13 m	16 m
B	Amarela	< 10 m	17 m	29 m	37 m
	Laranja	< 10 m	11 m	18 m	24 m
	Vermelha	< 10 m	< 10 m	13 m	17 m

Conforme visto na segunda simulação do item 4.1.2, na simulação de *jet fire* para rompimento da linha com furo 0.5 cm, as dimensões de tubo utilizadas foram 16 polegadas de diâmetro e 81.28 metros de comprimento. E a vazão de vazamento máxima foi de 140 kg/min. A Figura 4.28 mostra a variação da vazão ao longo do tempo. A vazão decresce até se tornar nula aproximadamente em 35 minutos.

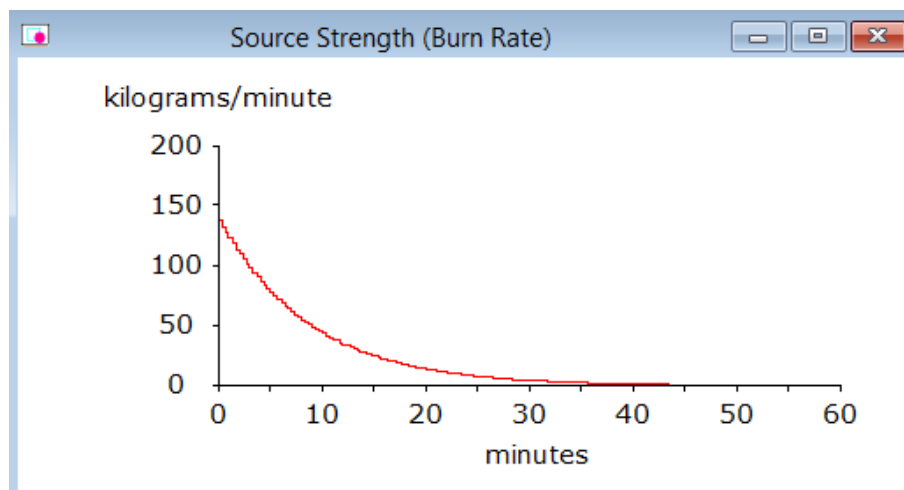


Figura 4.28: Comportamento da taxa de combustão no tempo para *jet fire* em tubo com 81.28 m de comprimento.

Utilizando um comprimento do tubo duas vezes maior, ou seja, 163 m, e realizando a simulação nas mesmas condições, se obtêm os resultados da figura 4.29. É possível perceber que as zonas de ameaça permanecem as mesmas do caso anterior, assim como a taxa máxima de combustão. Já na figura 4.30 é possível perceber uma mudança no comportamento da vazão, que decresce mais lentamente que no caso anterior, se tornando nula em aproximadamente 60 min.

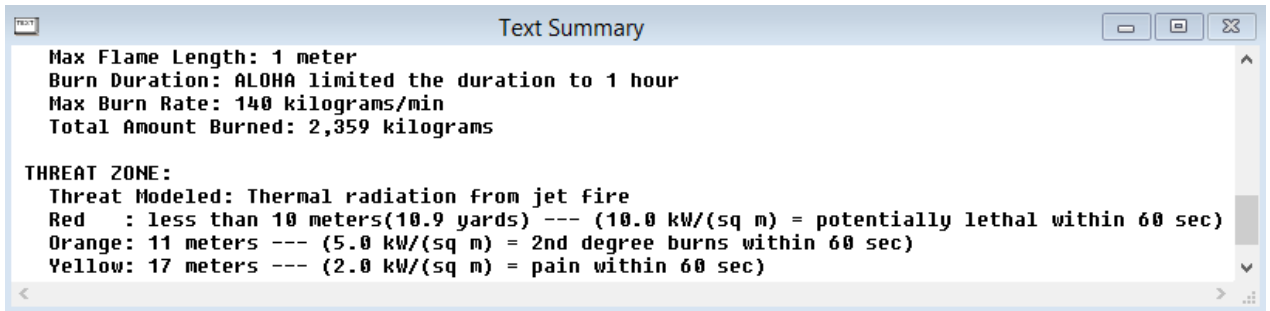


Figura 4.29: Resultados da simulação de *jetfire* em tubo com 163 m de comprimento.

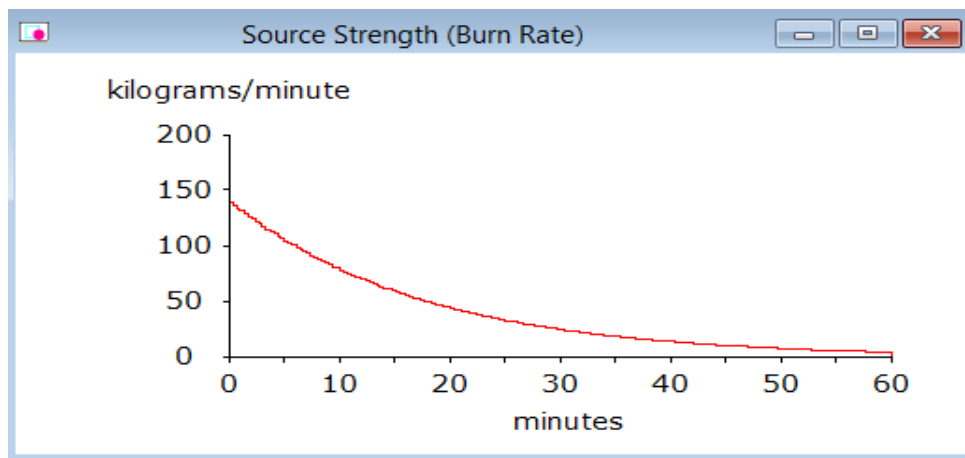


Figura 4.30: Comportamento da taxa de combustão no tempo para *jet fire* em tubo com 163 m de comprimento.

Simulando cenário semelhante com comprimento de tubo oito vezes maior que o inicial, ou seja, 650 metros, obtêm-se resultados iguais para dimensões das zonas de ameaça (Figura 4.31) e mudança no comportamento da vazão (Figura 4.32). De forma análoga ao caso anterior, a vazão diminui de forma mais lenta com o aumento do comprimento do tubo.

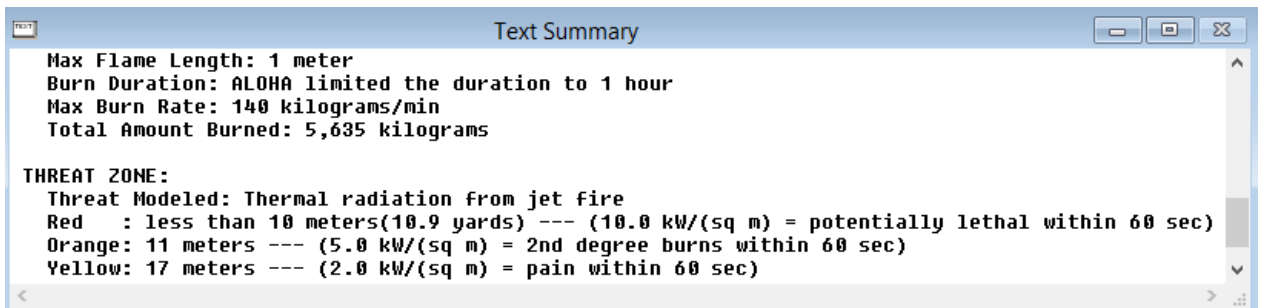


Figura 4.31: Resultados da simulação de *jet fire* em tubo com 650 m de comprimento.

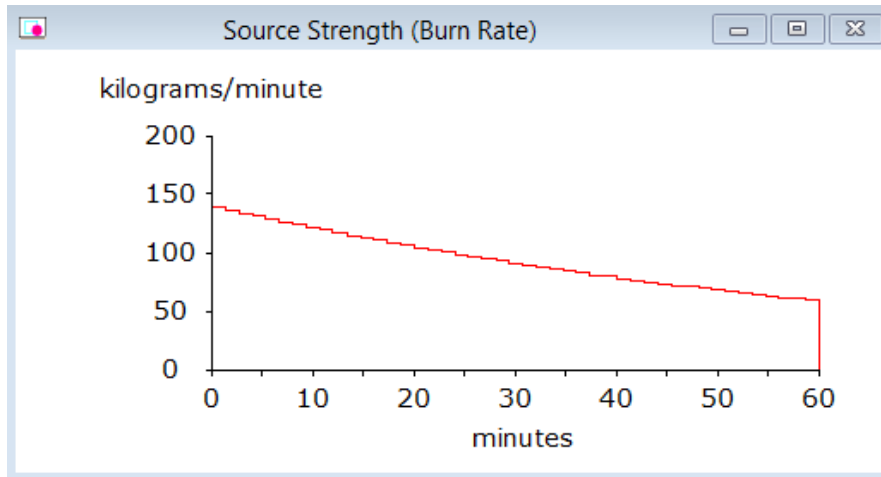


Figura 4.32: Comportamento da taxa de combustão no tempo para *jet fire* em tubo com 650 m de comprimento.

Com o comprimento do tubo 16 vezes maior que o inicial, ou seja, 1.301 metros, os resultados para as dimensões das zonas de ameaça continuam iguais, conforme Figura 4.33. Com relação ao comportamento da taxa de combustão, o aumento da tubulação permanece provocando um decréscimo ainda mais lento na vazão, como é observado na Figura 4.34.

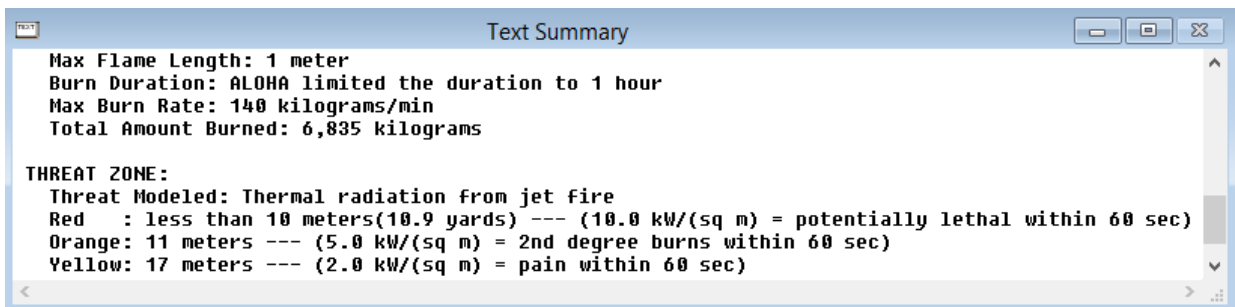


Figura 4.33: Resultados da simulação de *jet fire* em tubo com 1.301 m de comprimento.

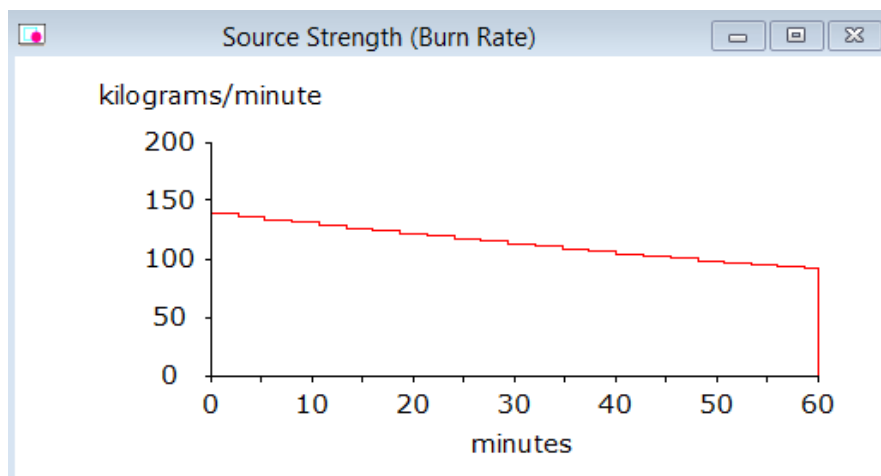


Figura 4.34: Comportamento da taxa de combustão no tempo para *jet fire* em tubo com 1.301 m de comprimento.

Finalmente, utilizando um valor de comprimento de 20 quilômetros, ou seja, 246 vezes maior que o inicial, a vazão se torna aproximadamente constante (Figura 4.36). Enquanto as dimensões das zonas de ameaça permanecem inalteradas (Figura 4.35).

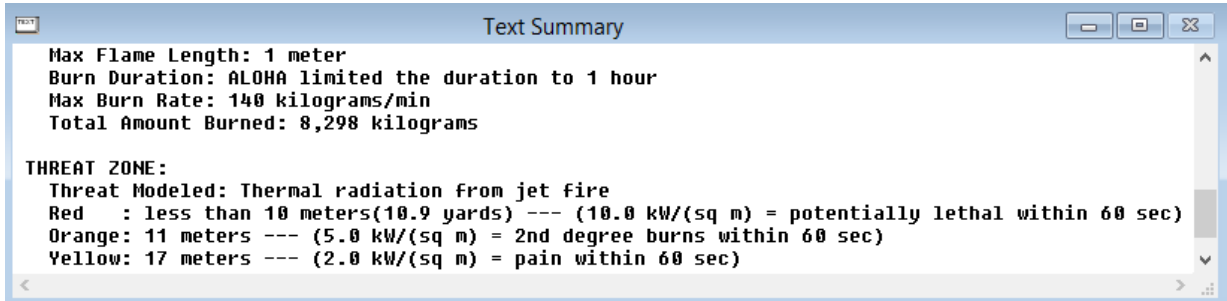


Figura 4.35: Resultados da simulação de *jet fire* em tubo com 20.000 m de comprimento.

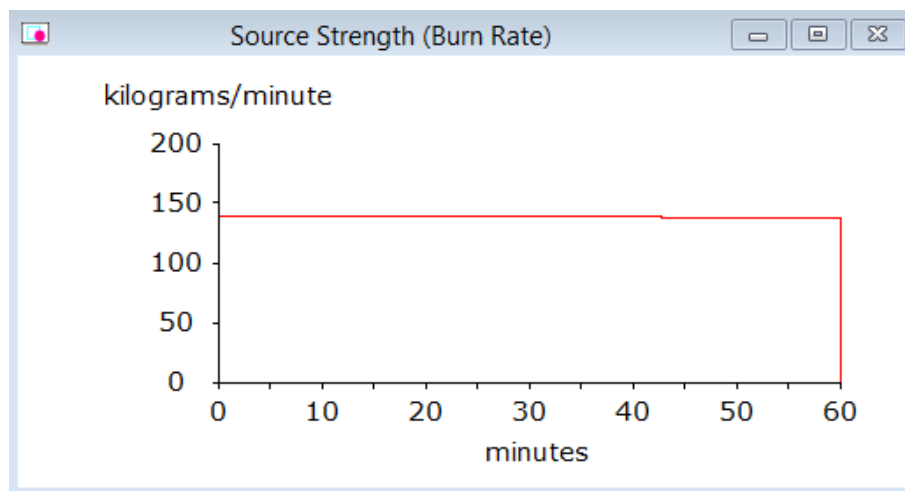


Figura 4.36: Comportamento da taxa de combustão no tempo para *jet fire* em tubo com 20.000 m de comprimento.

Logicamente a vazão permanece constante quando o comprimento aumenta para 28.150 m, ou seja, 346 vezes maior que o inicial (Figura 4.38). Isso indica que a tubulação passa a se comportar como um reservatório infinito para o caso avaliado. As dimensões das zonas de ameaça permanecem inalteradas (Figura 4.37).

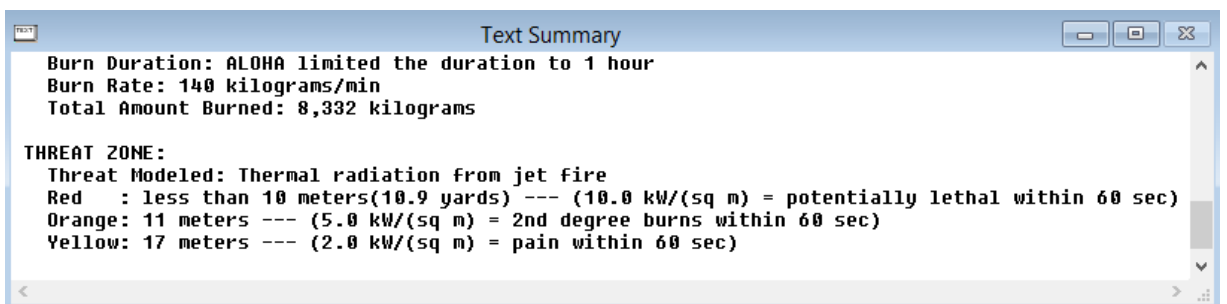


Figura 4.37: Resultados da simulação de *jet fire* em tubo com 28.150 m de comprimento.

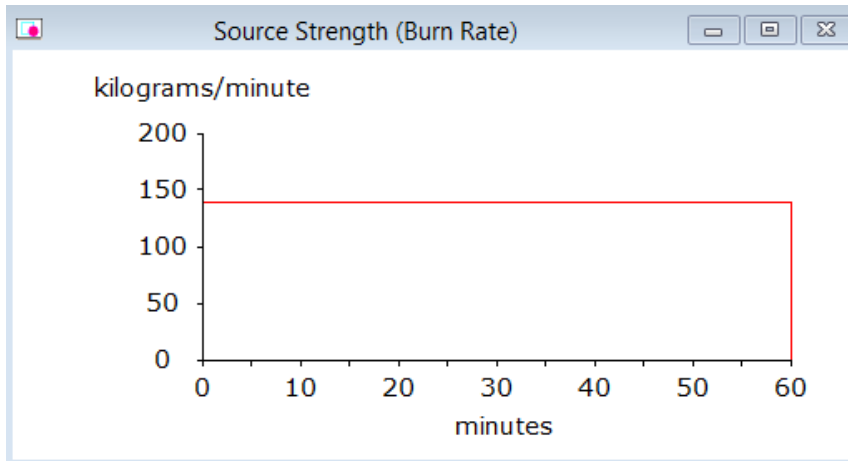


Figura 4.38: Comportamento da taxa de combustão no tempo para *jet fire* em tubo com 28.150 m de comprimento.

4.2 Simulação de Cenários envolvendo nuvem inflamável

De forma distinta dos cenários anteriores, quando o gás não entra em combustão imediatamente após ser liberado na atmosfera, existe a possibilidade de formação de nuvem inflamável. Ou seja, a concentração de gás inflamável na atmosfera supera o Limite Inferior de Inflamabilidade (LII), o que, juntamente com o oxigênio presente no meio, permite a formação de fogo desde que na presença de fonte de ignição.

Para avaliar este cenário foram realizadas simulações semelhantes às anteriores. As especificações empregadas no ALOHA para simular a formação de nuvem inflamável encontram-se nas Figuras 4.39 e 4.40.

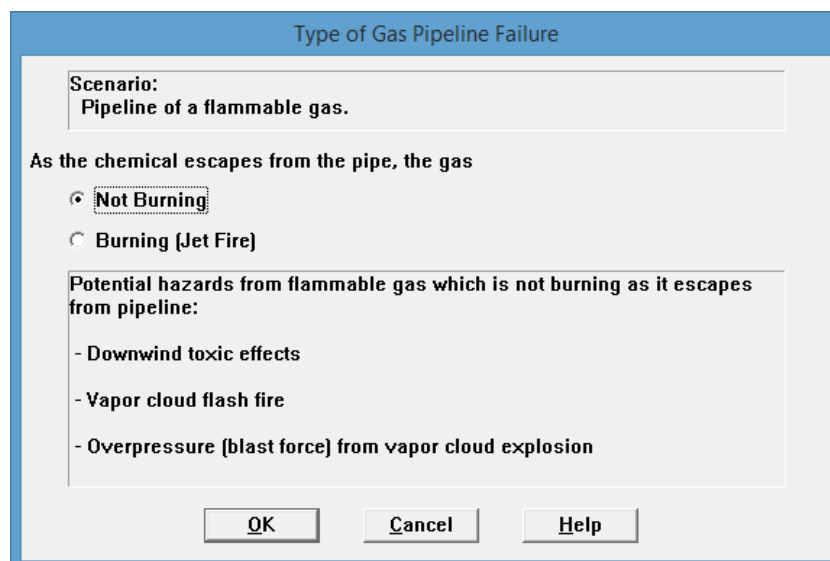


Figura 4.39: Captura de tela com especificação do tipo de falha, onde o gás não entra em combustão ao escapar da tubulação.

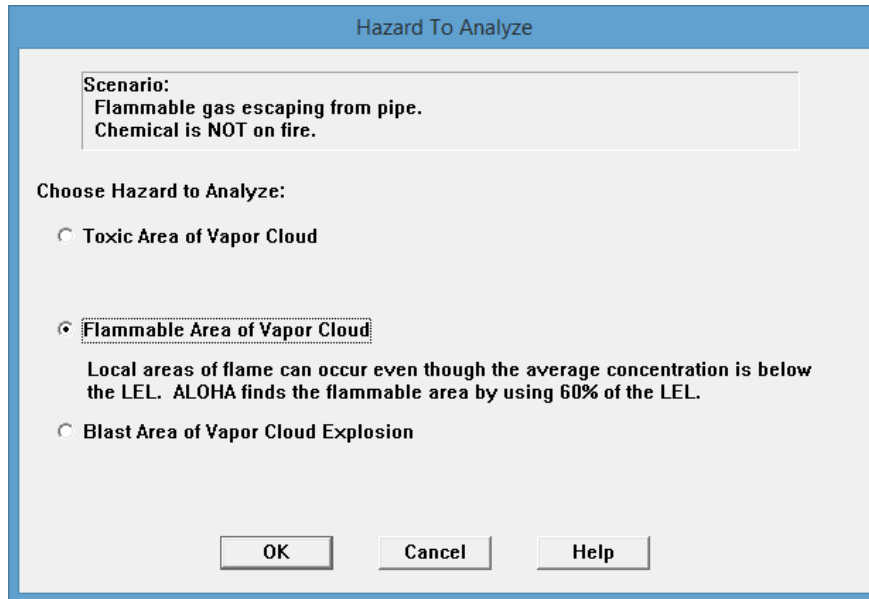


Figura 4.40: Captura de tela com especificação do tipo de perigo a ser analisado.

É possível notar ainda, na Figura 4.40, que o ALOHA considera como área inflamável aquela que contém concentração igual ou superior a 60% do Limite Inferior de Explosividade.

4.2.1 Simulação de Rompimento Total da Tubulação

Nessa seção foram realizadas as mesmas simulações de Silva; Santos; Sant'Anna [2015] para os casos de nuvem inflamável devido a rompimento da tubulação C-02. O cenário corresponde à formação de nuvem inflamável a partir de rompimento total da tubulação. Foram adotadas as mesmas dimensões do respectivo cenário com *jet fire*, conforme as Figuras 4.41 e 4.42.

Os resultados para esta simulação se encontram na figura 4.43. A vazão máxima de vazamento de gás foi de 136.000 kg/min, enquanto a quantidade total vazada foi de 8.142.800 kg. O gráfico na Figura 4.44 representa a estimativa do ALOHA para as zonas de ameaça por formação de nuvem inflamável. É possível perceber duas zonas de ameaça, uma vermelha e outra amarela. A zona vermelha, onde a concentração está acima de 60% do LII, representa a área onde há enorme risco de formação de nuvem inflamável. A zona amarela representa a área onde a concentração de combustível é perigosamente elevada, maior que 10% do LII. O valor de 10% da LII é comumente utilizado em equipamentos de detecção de gases combustíveis (explosímetros), que são ajustados para acionar um alarme quando a concentração atinge esse limite [ZELLAMBIENTAL, 2015].

Gas Pipeline Input

Input pipe diameter Help

Diameter is inches cm

Input pipe length Help

Pipe length is ft yds meters

The unbroken end of the pipe is Help

connected to infinite tank source
 closed off

Select pipe roughness Help

Smooth Pipe
 Rough Pipe

Figura 4.41: Captura de tela com especificações da tubulação.

Pipe Pressure and Hole Size

Input pipe pressure Help

Pressure is psia atm Pa

Input pipe temperature Help

Unknown (assume ambient)
 Temperature is F C

Hole size equals pipe diameter. Help

Figura 4.42: Captura de tela com especificações de pressão, temperatura e dimensão do furo.

Em comparação aos cenários de *jet fire*, nota-se uma diferença com relação ao papel da direção do vento na formação das zonas de ameaça. No cenário de formação de nuvem inflamável, as zonas de ameaça são formadas na direção do vento, assim sua área não pode ser aproximada por um círculo. A zona vermelha apresentou 425 m de comprimento, o que corresponde a 142% do comprimento de uma plataforma, enquanto a zona amarela apresentou 2,6 km, o correspondente a 867% do comprimento de uma plataforma. Assim, ambos os valores ultrapassam de forma significativa o comprimento de uma plataforma e o cenário se configura altamente catastrófico. De forma semelhante ao caso de *jet fire*, este cenário está relacionado ao rompimento total da tubulação, um evento gravíssimo, mas de baixa frequência.

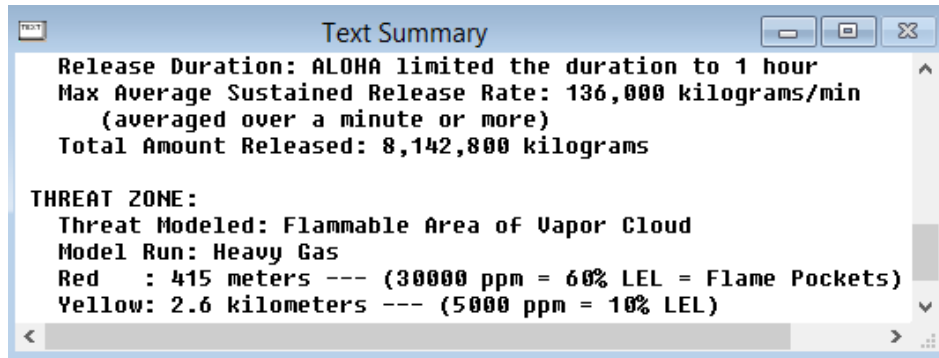


Figura 4.43: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável.

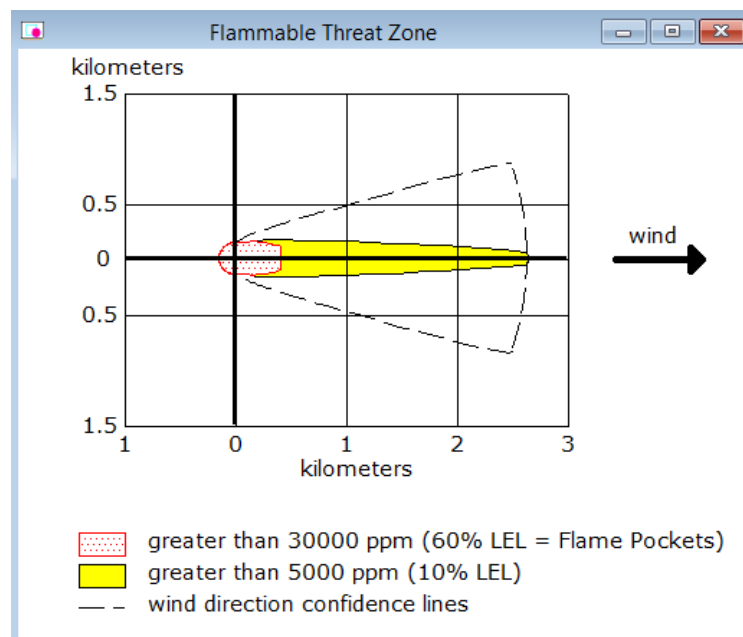


Figura 4.44: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de rompimento total.

4.2.2 Simulação de Furo na Tubulação

Como realizado nos casos de *jet fire*, as simulações que se seguem foram feitas com diâmetros de furos reduzidos, ou seja, cenários onde não há rompimento total. Foram utilizados os mesmos raios empregados para cenários de *jet fire*, variando de 0.2 a 1 cm, assim como dois tamanhos de tubulação, A e B. A tubulação A apresenta 16 polegadas de diâmetro e 81.28 metros de comprimento. A tubulação B apresenta diâmetro e comprimento vinte vezes maiores.

Os resultados para o cenário de nuvem inflamável a partir de um furo de 0.2 cm de raio encontram-se na Figura 4.45. A vazão máxima de vazamento foi de 21 kg/min, enquanto a quantidade total vazada foi de 816 kg.

As zonas de ameaça modeladas para este cenário podem ser vistas na Figura 4.46. A zona vermelha possui 54 metros de comprimento, o que equivale a 18% do comprimento de

uma plataforma. Já a zona amarela apresentou 135 metros de comprimento, equivalente a 45% do comprimento de uma plataforma. As dimensões atingidas pelas zonas de ameaça foram significativamente menores que para o caso de nuvem inflamável por rompimento total de tubulação, já que se trata de um tamanho de furo menor e a tubulação não está ligada a um “reservatório infinito”. Já com relação ao caso análogo com formação de *jet fire*, as dimensões atingidas pelas zonas de ameaça para nuvem foram muito superiores. No caso de *jet fire* todas as zonas apresentaram menos de dez metros de raio. Ou seja, a dispersão atmosférica do gás e potencial formação de nuvem inflamável apresenta potencial de afetar áreas mais afastadas (maior comprimento de zona de ameaça). O cenário de radiação térmica emitida por *jet fire* afeta apenas uma área circular nas imediações do evento, enquanto a nuvem inflamável pode gerar efeitos em áreas mais afastadas da fonte de vazamento.

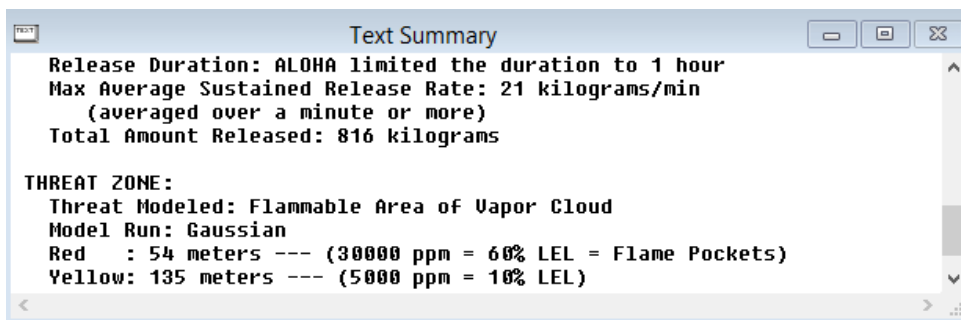


Figura 4.45: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.2 cm.

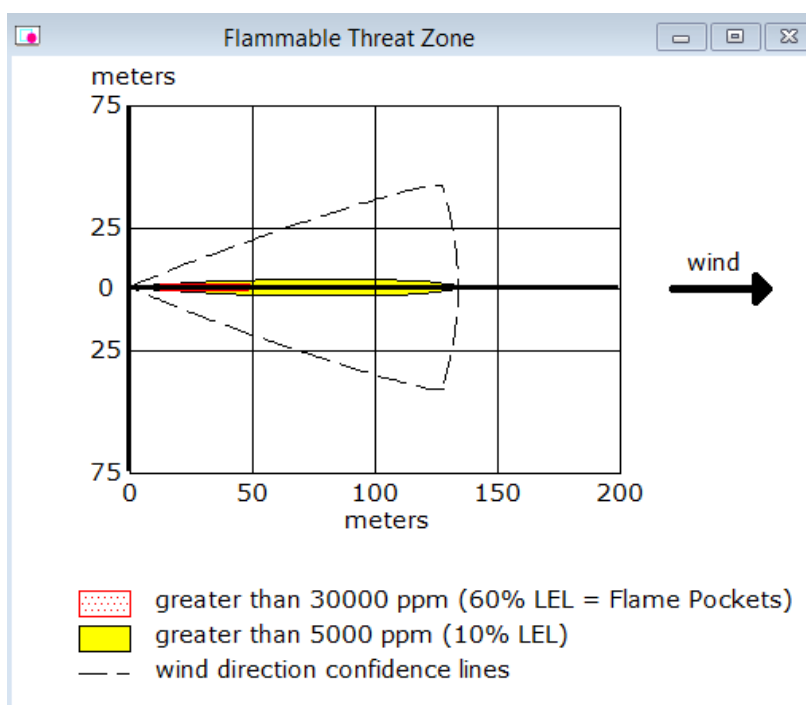


Figura 4.46: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.2 cm.

Os resultados para o cenário de nuvem inflamável a partir de um furo de 0.5 cm de raio encontram-se na Figura 4.47, enquanto as áreas de ameaça formadas estão na Figura 4.48. Com o aumento do raio do furo, a quantidade de gás vazado e as áreas de ameaça foram maiores. A vazão de vazamento do gás foi de 126 kg/min, enquanto a quantidade total vazada foi de 1.217 kg.

A zona de ameaça formada foi de 135 metros de comprimento (zona vermelha), o que corresponde a 45% do comprimento de uma plataforma. A zona amarela apresentou 340 metros de comprimento, equivalente a 113% do comprimento de uma plataforma. Novamente as áreas de ameaça de nuvem inflamável apresentaram dimensões muito superiores aquelas estimadas para *jet fire*.

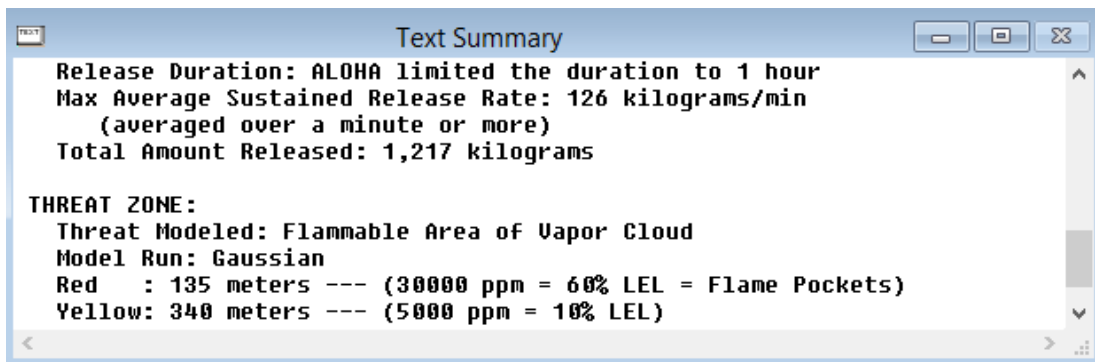


Figura 4.47: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.5 cm.

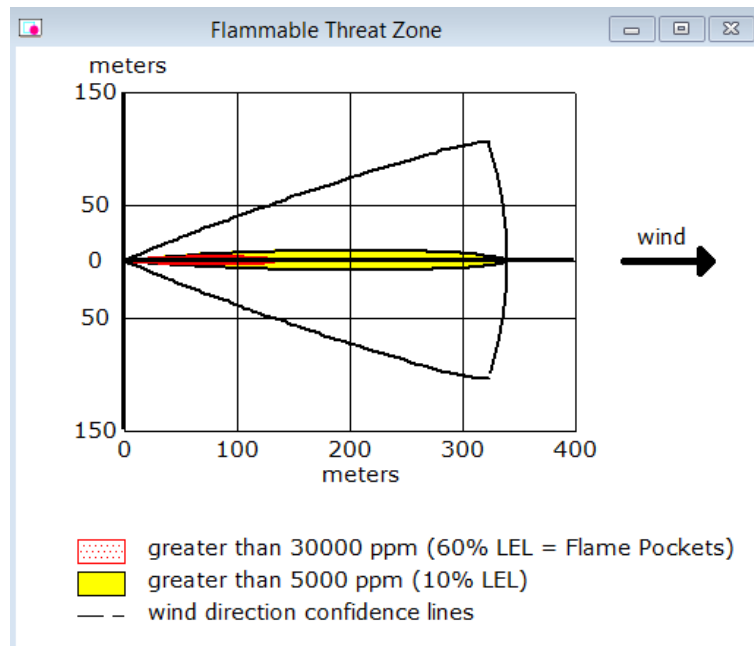


Figura 4.48: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.5 cm.

Os resultados para o cenário de nuvem inflamável formada a partir de furo de 0.8 cm de raio encontram-se na Figura 4.49. Conforme esperado o aumento do raio foi acompanhado por aumento na quantidade de gás vazada e nas dimensões das áreas de ameaça. A vazão foi de 311 kg/min, enquanto a quantidade de gás vazada foi de 1.218 kg.

As zonas de ameaça por formação de nuvem inflamável estão na Figura 4.50. A área vermelha possui 212 metros (71% do comprimento de uma plataforma) e a área amarela apresentou 501 metros (167% do comprimento de uma plataforma). De modo análogo aos casos anteriores, as regiões afetadas pela nuvem são muito maiores do que aquelas afetadas pelo *jet fire*.

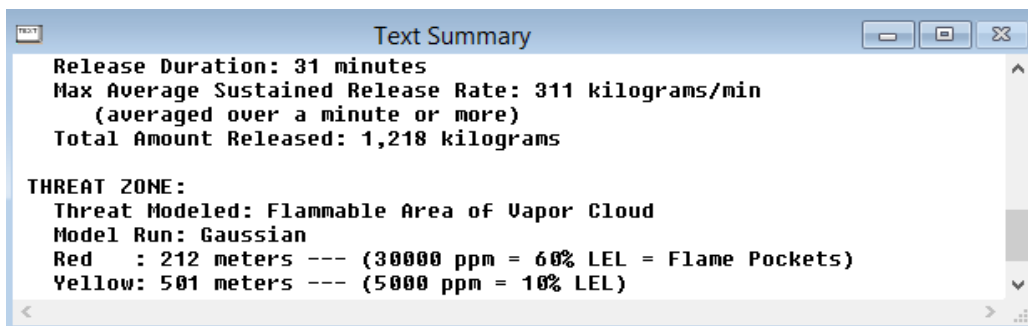


Figura 4.49: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.8 cm.

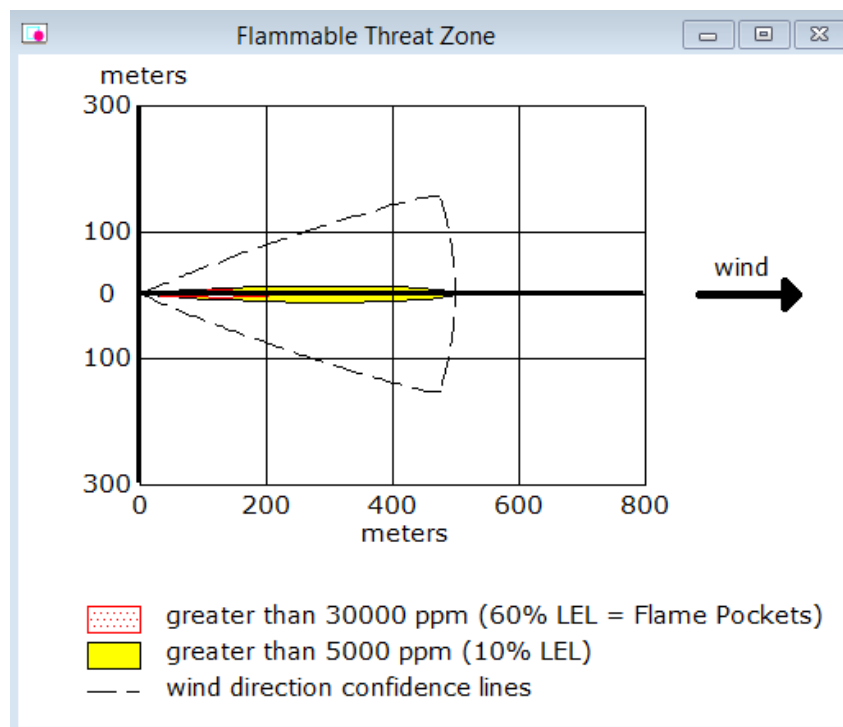


Figura 4.50: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.8 cm.

Finalmente os resultados para o cenário de nuvem inflamável a partir de um furo de 1.0 cm de raio encontram-se na Figura 4.51. A vazão foi de 450 kg/min, e a quantidade de gás vazada foi de 1.218 kg.

As zonas de ameaça foram de 252 metros de comprimento (84% do comprimento de uma plataforma) e amarela, de 577 metros de comprimento (192% do diâmetro de uma plataforma). A Figura 4.52 ilustra esse cenário.

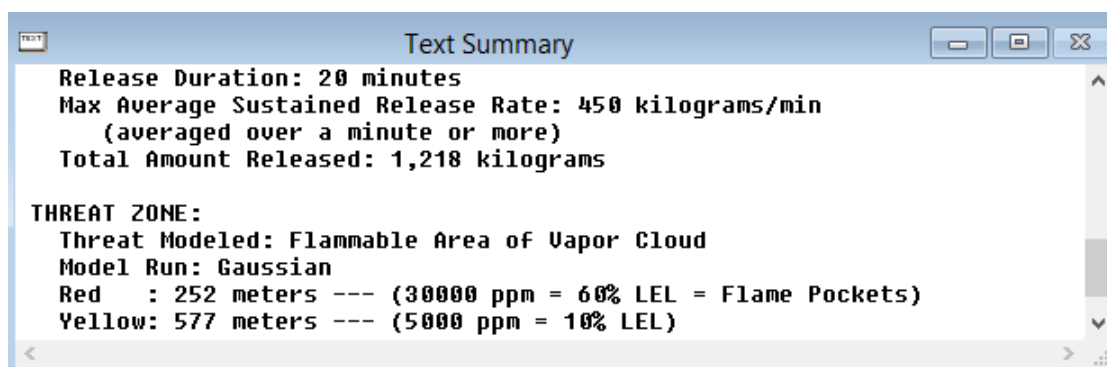


Figura 4.51: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 1.0 cm.

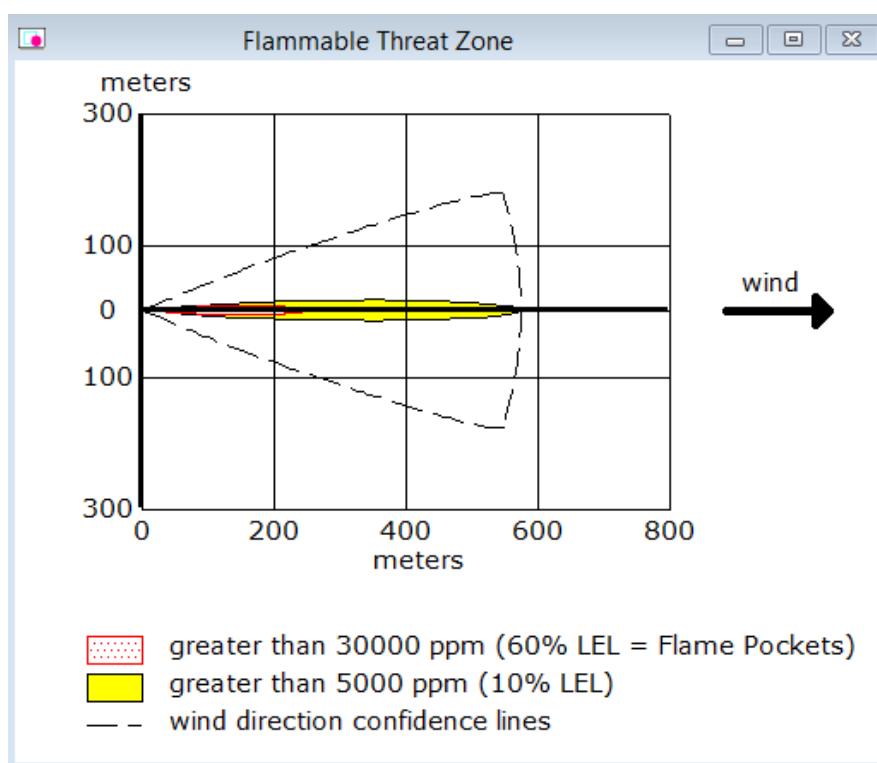


Figura 4.52: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 1.0 cm.

A Tabela 4.4 resume os resultados encontrados para todos os cenários de *jet fire* e nuvem avaliados com tubulação de dimensão A. É possível notar que para os cenários de nuvem inflamável, as dimensões das zonas de ameaça são consideravelmente maiores em termos de comprimento.

Tabela 4.4: Raios das zonas de ameaça de *jet fire* e comprimento das zonas de ameaça de nuvem inflamável em função dos raios de furo.

Cenário	Zonas	Raios do Furo (cm)			
		0,2	0,5	0,8	1
<i>Jet fire</i>	Amarela	< 10 m	17 m	28 m	35 m
	Laranja	< 10 m	11 m	18 m	23 m
	Vermelha	< 10 m	< 10 m	13 m	16 m
Nuvem inflamável	Amarela	135 m	340 m	501 m	577 m
	Vermelha	54 m	135 m	212 m	252 m

Na sequência foram realizadas simulações de nuvem inflamável com tamanho de tubulação B, ou seja, 320 polegadas de diâmetro e 1625,6 metros de comprimento.

Os resultados para o cenário com furo com raio de 0.2 cm estão na Figura 4.53 e a representação o gráfico das zonas de ameaça, na Figura 4.54. O vazamento apresentou uma taxa máxima de 22.5 kg/min e a quantidade total vazada foi de 1.350 kg.

As zonas modeladas foram: vermelha, com 56 metros de comprimento, e amarela, com 139 metros de comprimento. Assim, a zona vermelha corresponde a 19% do comprimento de uma plataforma, e a zona amarela corresponde a 46%. Em comparação ao cenário de nuvem inflamável para o mesmo tamanho de furo e tubulação menor, houve um aumento na dimensão da zona afetada significativamente maior do que nos respectivos cenários de *jet fire*.

A simulação de nuvem inflamável com tubulação de tamanho B e furo com raio 0.5 cm gerou os resultados apresentados na Figura 4.55 e na Figura 4.56. A vazão de vazamento foi de 140 kg/min, e a quantidade total vazada foi de 8.407 kg. A zona vermelha teve extensão de 143 metros, o que corresponde a 48% do comprimento de uma plataforma, enquanto a zona amarela teve comprimento de 362 metros, ou 120%. Novamente, com relação ao cenário análogo de formação de nuvem inflamável a partir de furo de mesmo raio, houve um aumento das zonas de ameaça.

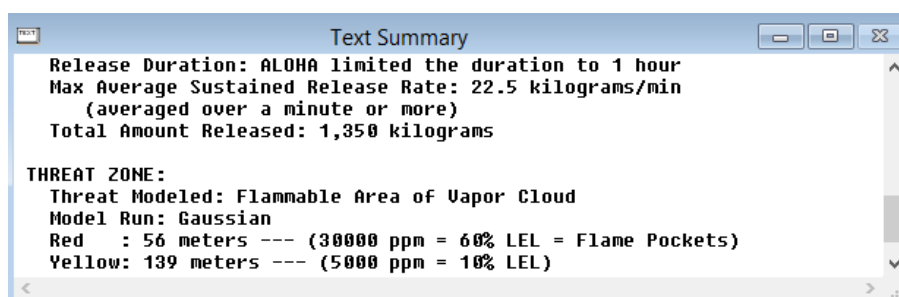


Figura 4.53: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.2 cm.

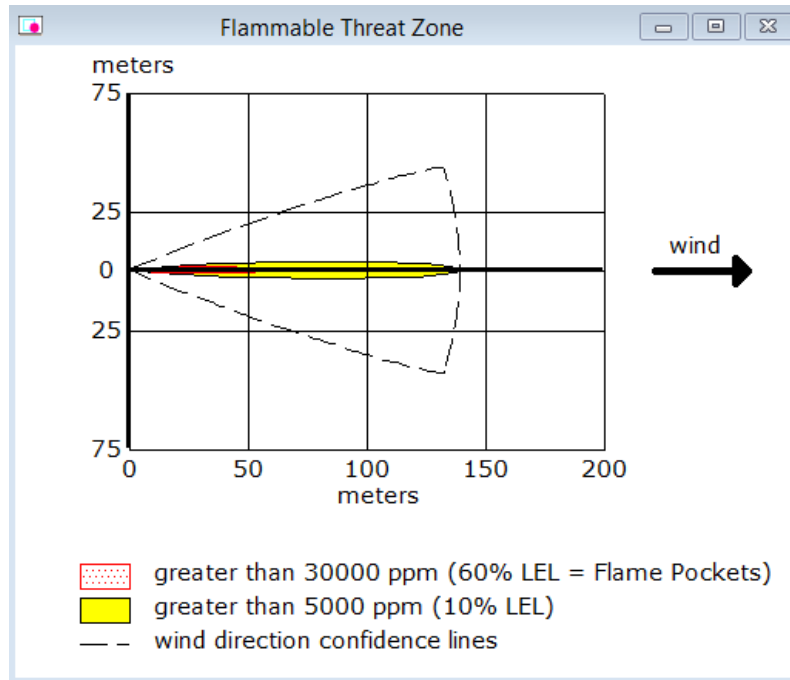


Figura 4.54: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.2 cm.

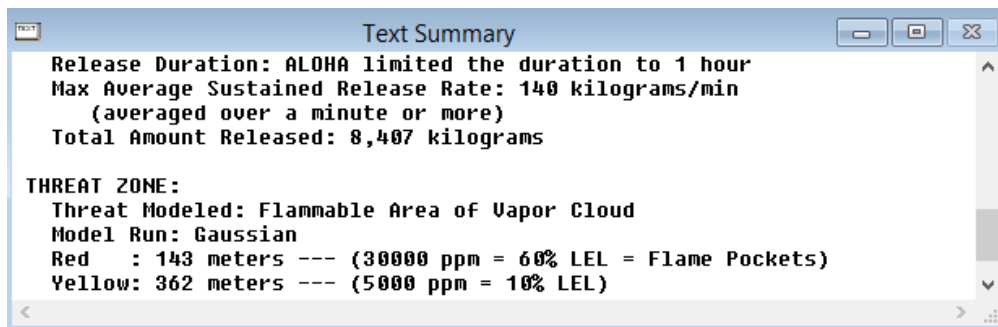


Figura 4.55: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.5 cm.

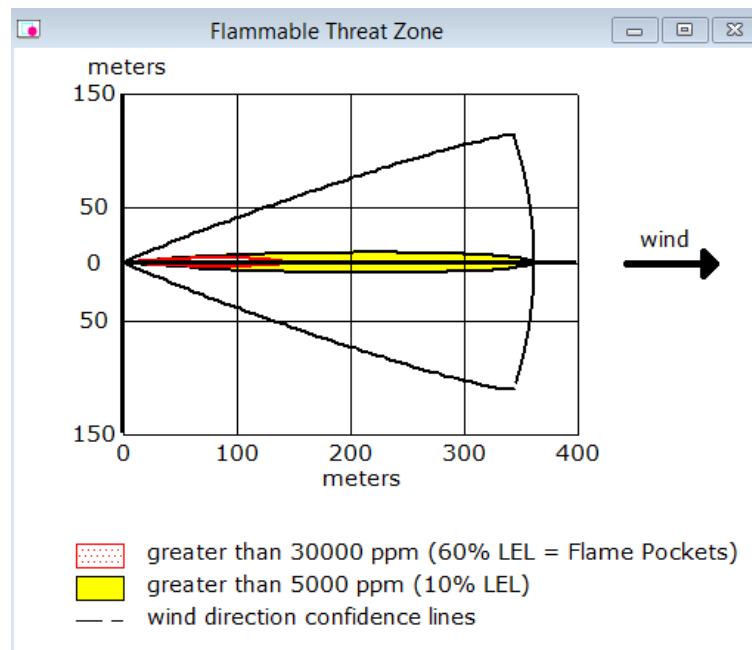


Figura 4.56: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.5 cm.

Os resultados para a simulação com furo de raio 0.8 cm podem ser vistos na Figura 4.57 e as zonas de ameaça estão apresentadas na Figura 4.58. A vazão de vazamento foi de 359 kg/min, e a quantidade vazada foi de 21.512 kg. A zona vermelha possui 231 metros, o que é equivalente a 77% do comprimento de uma plataforma. Já a zona amarela possui 600 metros de comprimento, o que equivale a 200% do comprimento de uma plataforma. Com relação ao caso equivalente para a tubulação A, com mesmo tamanho de furo, o aumento da tubulação foi acompanhado de um aumento nas dimensões das zonas de ameaça.

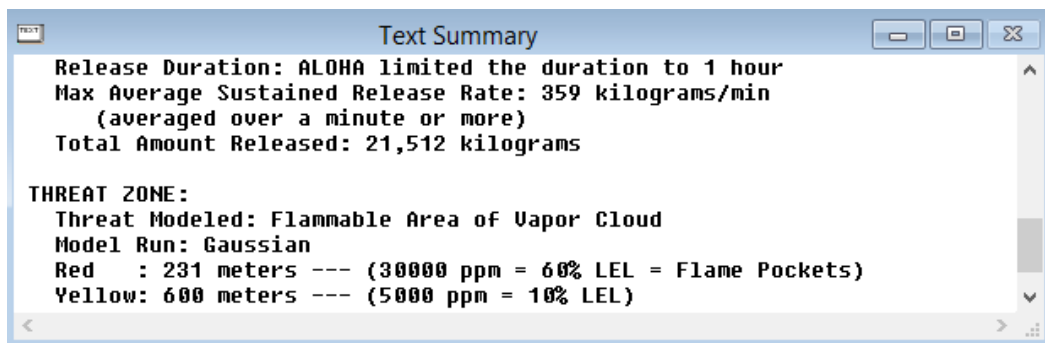


Figura 4.57: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 0.8 cm.

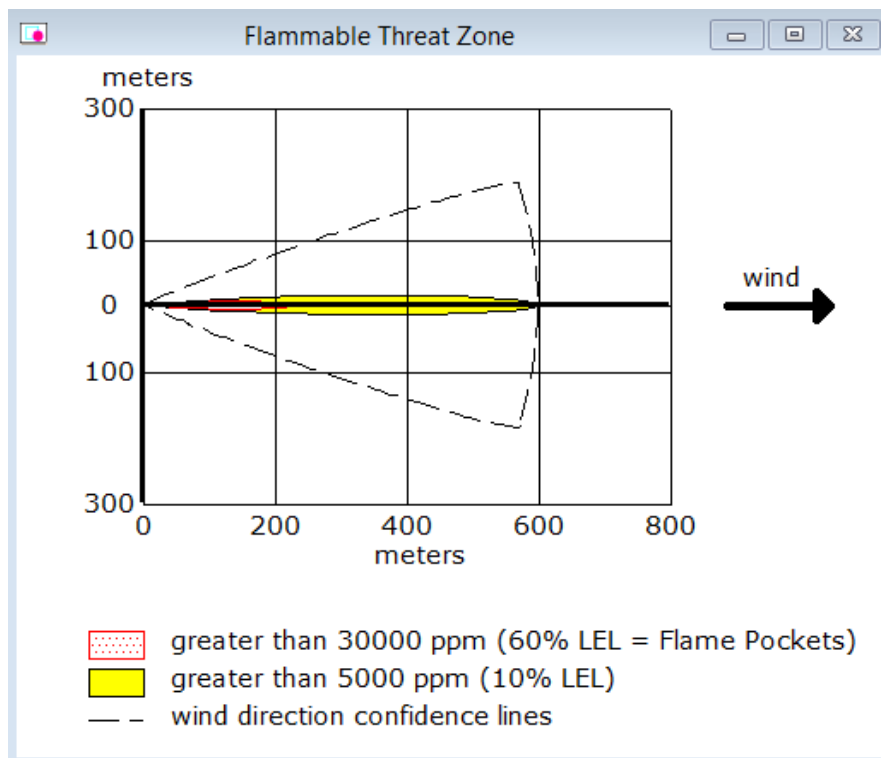


Figura 4.58: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 0.8 cm.

Finalmente, os resultados para a simulação com furo de raio 1.0 cm se encontram na Figura 4.59 e Figura 4.60. O vazamento de gás apresentou uma taxa máxima de 560 kg/min, e a quantidade vazada foi de 33.602 kg. A zona de ameaça vermelha, com 291 metros de

comprimento, corresponde a 97% do comprimento de uma plataforma. Enquanto a região amarela, com 769 metros de comprimento, equivale a 256% do comprimento de uma plataforma.

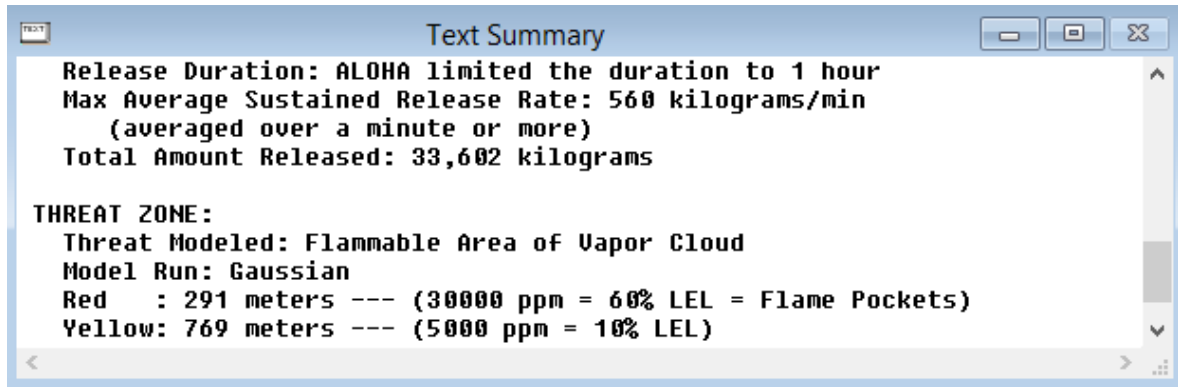


Figura 4.59: Resultados da simulação com formação de nuvem inflamável a partir de furo de 1.0 cm.

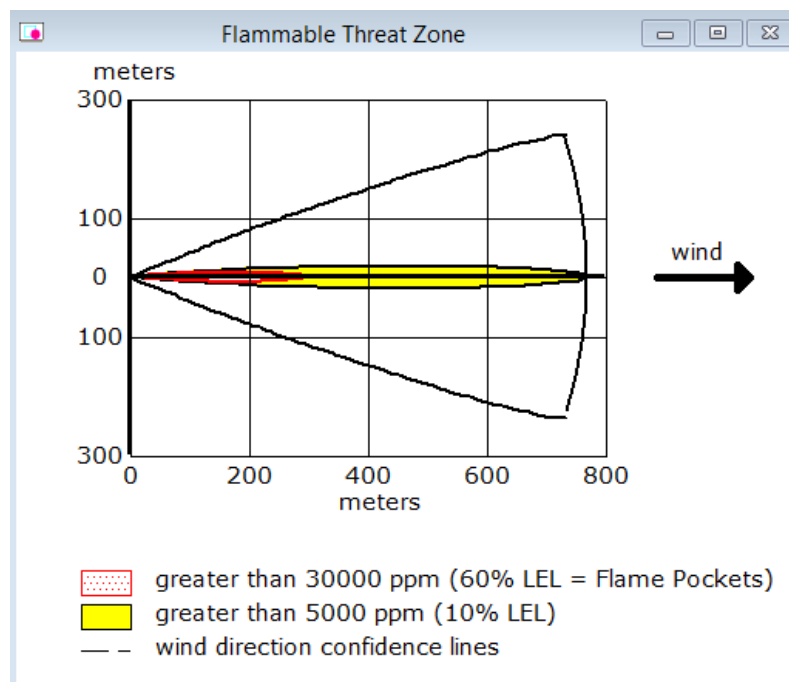


Figura 4.60: Zonas de ameaça para nuvem inflamável a partir de furo de 1.0 cm.

A tabela 4.5 resume os resultados dos cenários de *jet fire* e nuvem inflamável em função dos raios de furo e tamanho de tubulação. É possível verificar que tanto para os cenários de *jet fire* quanto para os cenários de nuvem inflamável, as dimensões das zonas de ameaça aumentam de forma mais rápida com o aumento do raio de furo do que com o aumento das dimensões da tubulação. Observa-se ainda que a influência do raio do furo sobre as dimensões das zonas de ameaça fica maior conforme as dimensões da tubulação aumentam. Comparando os cenários de *jet fire* e nuvem inflamável, é possível perceber que as

zonas de nuvem inflamável apresentaram comprimentos consideravelmente maiores que os raios das zonas de *jet fire*.

Tabela 4.5: Raios das zonas de ameaça de *jet fire* e comprimento das zonas de ameaça de nuvem inflamável em função dos raios de furo e tamanho de tubulação.

Cenário	Tamanho de tubulação	Zonas	Raios do Furo (cm)			
			0,2	0,5	0,8	1
<i>Jet fire</i>	A	Amarela	< 10 m	17 m	28 m	35 m
		Laranja	< 10 m	11 m	18 m	23 m
		Vermelha	< 10 m	< 10 m	13 m	16 m
	B	Amarela	< 10 m	17 m	29 m	37 m
		Laranja	< 10 m	11 m	18 m	24 m
		Vermelha	< 10 m	< 10 m	13 m	17 m
Nuvem inflamável	A	Amarela	135 m	340 m	501 m	577 m
		Vermelha	54 m	135 m	212 m	252 m
	B	Amarela	139 m	362 m	600 m	769 m
		Vermelha	56 m	143 m	231 m	291 m

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo simular cenários de acidentes em um sistema de gás combustível, comumente presente em plataformas offshore, a partir da simulação de um processo e sua análise preliminar de risco.

A partir da caracterização de uma planta química é possível realizar uma análise qualitativa dos variados riscos envolvidos no processo. A metodologia APR é frequentemente usada nessa análise de risco inicial. Análise mais detalhada demanda o conhecimento das condições de processo. Através do uso de um simulador de processos, como o HYSYS, é possível estimar as especificações de cada corrente e equipamento. Essas informações são então usadas em avaliações mais complexas dos riscos existentes. Finalmente, um simulador de cenários acidentais, como o ALOHA, fornece uma análise das consequências destes cenários, tomando como base as informações estimadas pelo simulador de processos.

As simulações de cenários acidentais em uma plataforma *offshore* realizadas neste trabalho permitiram avaliar diferentes tipos de acidentes a partir de um único cenário proveniente de uma APR. Tornou-se possível avaliar tanto cenários de maior frequência quanto cenários raros porém catastróficos.

Assim, foram simulados cenários de *jet fire* e nuvem inflamável a partir da ruptura total e parcial de uma tubulação com tipos de dimensão diferentes.

Nas simulações de ruptura total de tubulação os resultados foram catastróficos, de tal forma que as zonas de maior ameaça de *jet fire* e nuvem inflamável ultrapassaram as dimensões da plataforma. A dimensão dos acidentes foi atribuída ao fato de se tratar de um rompimento total de tubulação de alta pressão, condição imposta pelo ALOHA para o caso de uma das extremidades da tubulação estar ligada a um reservatório infinito. As causas que levam a estes cenários catastróficos, porém, apresentam frequência extremamente reduzida.

Já para os casos mais prováveis, de rompimento parcial da tubulação, foram feitas simulações variando o raio do furo e as dimensões da tubulação. Através dos resultados foi possível perceber que tamanho da tubulação foi um fator que influenciou pouco nas dimensões das zonas de ameaça, especialmente quando comparada a influência do raio de furo. Como esperado, em todos os casos o aumento do raio provocou um aumento das zonas de ameaça. Em contrapartida, comparando os cenários de mesmo raio de furo de vazamento, o aumento na dimensão da tubulação não provocou um aumento significativo nas zonas de ameaça.

Além disso, ao simular rompimento parcial de uma tubulação de dimensões excessivamente grandes, foi possível ultrapassar a limitação inicialmente imposta pelo ALOHA, de que para uma tubulação ligada a um reservatório infinito, o rompimento da tubulação seja total.

Foi possível perceber que mesmo para furos de vazamento pequenos (menores que um centímetro de raio), as zonas de ameaça de *jet fire* e nuvem inflamável atingiram distâncias que poderiam causar danos graves às instalações da plataforma e ao ser humano, além de fatalidades. Desse modo, são perigos que demandam atenção no gerenciamento de riscos em uma plataforma.

Como sugestão de trabalhos futuros pode-se citar a realização de comparações com outros simuladores de cenários acidentais. Ferramentas baseadas em fluido dinâmica computacional (CFD) poderiam apresentar maior acurácia nos resultados. A simulação de outros tipos de cenários de acidentais também se apresenta relevante.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. A. (s.d.). **Metodologias de Análises de Riscos: APP & HAZOP**. Disponível em:
<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/13179/material/APP_e_HAZOP.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2015
- ALLEN; DURRENBERGER. **Dispersion modeling**. University of Texas at Austin. 2013. Disponível em: <http://www.utexas.edu/research/ceer/che357/dispersion_modeling.htm>. Acesso em: 25 jun. 2015
- AMORIM, T. O. d. **Plataformas offshore: Uma breve análise desde a construção ao Descomissionamento**. 54p. Trabalho de Conclusão de Curso – Tecnologia em Construção Naval, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro. 2010.
- AREASEG. **Fogo e Incêndio**. Disponível em: <<http://www.areaseg.com/fogo/>>. Acesso em: 30 jul. 2015
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL-BNDES. (s.d.). **Desenvolvimento da cadeia produtiva de petróleo e gás e investimentos em E&P**. Disponível em:
<http://www.bnDES.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bnDES_pt/Galerias/Arquivos/empr esa/pesquisa/chamada1/RelConsol-4de6.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2015
- BRASIL, N.I do; ARAÚJO, M.A.S.; DE SOUSA, E.C.M. **Processamento Primário de Petróleo e Gás**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- COMPANHIA ESTADUAL DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO BÁSICO E CONTROLE DE POLUIÇÃO DAS ÁGUAS – CETESB. **Norma Técnica P4.261 - Risco de Acidente de Origem Tecnológica: Método para decisão e termos de referência**. 2 ed. Dez, 2011. 140p.
Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/11/2013/11/P4261-revisada.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2015
- COSTA, R. C. da; PIRES, V, H.; LIMA, G. P. S. de L. Mercado de embarcações de apoio marítimo às plataformas de petróleo: oportunidades e desafios. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 28, set. 2008. Disponível em:
<http://www.funcex.org.br/material/REDEMERCOSUL_BIBLIOGRAFIA/biblioteca/ESTU DOS_BRASIL/BRA_174.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2015
- CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Chemical process safety: Fundamentals with applications**. 2nd ed. Boston: Prentice Hall. 2002. xix, 625p.
- DINIZ, F. L. B.; OLIVEIRA, L. F. S. d.; BARDY, M. B., Vieira, N. V. **Apostila do Curso sobre estudo de análise de riscos e Programa de gerenciamento de riscos**. Ministério do Meio Ambiente Secretaria de Qualidade Ambiental. DNV. 2006. Disponível:
<http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/_3.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2015

DNV. (s.d.). **Estimativa de Consequências e Análise de Vulnerabilidade**. Análise Quantitativa de Riscos: Etapa 1. Disponível em: <<http://www.dnvba.com/br/Sustentabilidade/saude-e-seguranca-ocupacional/analise-quantitativa-de-riscos/Pages/estimativa-de-consequencias-e-analise-de-vulnerabilidade.aspx>>. Acesso em: 21 jun. 2015

EPA; NOAA. **Manual do usuário ALOHA**. Washington, D. C.: The Cameo Software System. 195p. 2007.

INFOPETRO. **Exploração e produção de petróleo e gás em águas profundas: evolução e tendências I**. Águas profundas, estratégias empresariais, investimento, Petrobras, setor de petróleo, tecnologia. 2011. Disponível em: <<https://infopetro.wordpress.com/2011/08/15/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas-em-aguas-profundas-evolucao-e-tendencias-i/>>. Acesso em: 15/08/2015

MARIANO, J. B. **Impactos ambientais do refino de petróleo**. 289 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio De Janeiro. 2001.

MOREIRA, D.; TIRABASSI, T. Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, vol. vii, n. 2, jul./dez. 2004.

MAIA, L., NETO. **Identificação de perigos e avaliação de riscos em uma unidade offshore na fase de operação**: estudo de caso de um FPSO. 176 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2007.

NOAA. **ALOHA (Areal Locations Of Hazardous Atmospheres) 5.0** - Theoretical Description. viii, 92p. Washington. 1992.

NOLAN, D. P. **Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles**: for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities. 3rd ed. Oxford: Elsevier, 2014. pp. 137–151.

OLIVEIRA, M. d. P. **Estudo de Caso da gestão de segurança industrial de uma plataforma de petróleo offshore**. 110 p. Dissertação (mestrado) - Sistema de gestão de segurança e saúde ocupacional, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2008.

OLIVEIRA, H. P. d. **Análise da estrutura suporte do heliponto de uma unidade Auto-elevatória**. 70 p. Projeto Final de Curso – Escola Politécnica, Engenharia naval e oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

REPSOL. **Matriz Energética Mundial**. Disponível em: <https://www.repsol.com/pt_pt/corporacion/conocer-repsol/contexto-energetico/matriz-energetica-mundial/> Acesso em: 15 ago. 2015.

RIGOLIN, P. H. d. A. **Avaliação global dos modos energéticos de transporte do gás natural inclusive como energia secundária**. 101p. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

SANT'ANNA, A. A. **Simulação de Processamento de Gás Natural em Plataforma Off-Shore**. 126 p. Projeto final de curso – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

SARTORI, A. M. d. A; MOREIRA, V. A. **Simulação de cenários acidentais envolvendo unidade de separação de biodiesel**. 66 p. Projeto final de curso – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2014.

SILVA, C. C. d.; SANTOS, P. M. R. d.; SANT'ANNA, R. P. **Análise de Risco de um Sistema de Gás Combustível com Apoio de Simulações**. 53 p. Projeto final de curso – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015.

SPICER, T.; HAVENS, J. **User's guide for the DEGADIS 2.1 dense gas dispersion model**. Washington, D.C. 1989.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência. Petrobras, 2001. xvi, 271p.

VAZ, J. C. **Síntese de controle e análise de cenários em plantas offshore de óleo e gás**. 167p. Dissertação (mestrado)- Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.

ZELLAMBIENTAL. (s.d.). **Detecção de gases**. Disponível em: <<http://zellambiental.blogspot.com.br/p/o-que-significa-limite-inferior-de.html>>. Acesso em: 15 jun. 2015